

**На правах рукописи**

**Конюхов Владимир Михайлович**

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ  
ПРИ ДВУХФАЗНОЙ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ  
В ПЛАСТАХ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ**

**01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы**

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико–математических наук**

**КАЗАНЬ – 2004**

Работа выполнена в Отделении механики Научно–исследовательского института математики и механики им. Н.Г. Чеботарева и на кафедре прикладной математики государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. В.И. Ульянова–Ленина.

Официальные оппоненты:	доктор геолого–минералогических наук, профессор, чл.–корр. РАН В.Г. Румынин
	доктор физико–математических наук, профессор, почетный член РАЕН Ю.М. Молокович
	доктор физико–математических наук, в.н.с. А.Б. Мазо

Ведущая организация:	Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина
----------------------	---

Защита состоится 25 ноября 2004 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.081.11 при Казанском государственном университете по адресу: 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Казанского государственного университета.

Автореферат разослан “\_\_\_” октября 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физ.–мат. наук, доцент А.А. Саченков

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Процессы фильтрации и массопереноса в коллекторах сложной структуры составляют сущность многих явлений в природе и разнообразных технологиях разработки нефтяных месторождений, распространения загрязнений в пресноводных горизонтах и т.д.

При добыче нефти из неоднородных по простираению и по толщине нефтяных залежей, трещиновато–пористых коллекторов такие процессы имеют весьма сложный характер, обусловленный как структурой пластов, так и методами воздействия на них с целью повышения эффективности нефтеизвлечения (циклическое и физико–химическое заводнение, применение горизонтальных скважин (ГС) и т.д.).

Другой проблемой является ухудшение фильтрационных характеристик нефтяного пласта в окрестности скважин как при их бурении и освоении, так и в процессе эксплуатации. Для улучшения состояния призабойной зоны используются различные способы. Одним из наиболее простых и дешевых является метод имплозионного воздействия, инициирующий взаимосвязанные процессы в скважине, имплозионной камере и пласте.

К сожалению, с развитием нефтедобывающей, химической и других отраслей промышленности нередкими стали техногенные аварии, приводящие к загрязнению водоносных пластов неорганическими либо углеводородными жидкостями. Экологические проблемы природного характера возникают и в приморских регионах, где чрезмерный водоотбор приводит к интрузии морской воды в пресноводные горизонты.

Практическая значимость теоретического изучения процессов, протекающих при всех указанных выше видах воздействий на фоне фильтрации насыщающих пористую среду флюидов и взаимодействия различных физических полей с полями фильтрационных потоков, очевидна. Соответствующие фильтрационные задачи давно привлекают внимание механиков, математиков, гидрогеологов и многих других специалистов. Однако, несмотря на то, что в области двухфазной фильтрации накоплен весьма богатый экспериментальный и теоретический опыт, в силу значительной сложности изучаемых объектов имеющиеся результаты являются далеко не полными. Они не снимают как проблемы адекватных рассматриваемым процессам математических постановок сложных сопряженных задач механики пористых сред, так и необходимости создания новых и развития известных методов их решения. Все это в конечном итоге определяет актуальность тематики диссертации и позволяет сформулировать

**цель диссертации:** математическое описание двухфазных многокомпонентных фильтрационных течений в пластах сложной структуры, разработка численных методов решения конкретных задач и анализ на их ос-

нове особенностей процессов фильтрации и гидродинамических эффектов при различных способах воздействия на пласт.

### **Основные задачи исследования:**

- изучить гидродинамические эффекты при двухфазной многокомпонентной фильтрации, обусловленные взаимодействием скачков водонасыщенности и концентрации высоковязких загустителей с границами разрыва абсолютной проницаемости; оценить влияние такого взаимодействия на поля фильтрационных потоков и на ход фильтрационного процесса;

- дать оценку основных характеристик разработки слоисто–неоднородных пластов при отсутствии и наличии подошвенной воды в зависимости от способа размещения горизонтальных скважин и изучить влияние их длины на нефтеотдачу зонально–неоднородных нефтяных коллекторов;

- построить математическую модель процесса пятикомпонентной фильтрации при вытеснении нефти водой с образованием подвижных высоковязких оторочек гидрогеля за счет химической реакции между двумя гелеобразующими компонентами в слоисто–неоднородном пласте;

- разработать эффективные методы численного решения двумерных задач вытеснения нефти водой и оценить эффективность физико–химического воздействия на пласт по сравнению с обычным заводнением;

- разработать математические и численные модели процесса циклического заводнения трещиновато–пористых пластов с учетом упругоэластичности фаз, пористой среды, трещин и различия фазовых проницаемостей при движении флюидов в пористых блоках и трещинах для случаев малых блоков и блоков произвольного размера; изучить механизм циклического вытеснения нефти водой и влияние периода, амплитуды и сдвига фаз на нефтеотдачу трещиновато–пористых пластов;

- построить математическую модель распространения тяжелых неорганических и углеводородных загрязнений в водоносных пластах сложной структуры; провести анализ общих свойств решения; с учетом полученной априорной информации разработать эффективные численные методы решения двумерных задач миграции пятна загрязнения в вертикальном разрезе пласта; исследовать гидродинамические эффекты, возникающие в поле фильтрационного потока из–за совместного влияния гравитации, инфильтрации, напорного течения и структуры пласта на быстрой и медленной стадиях интрузии морской воды и внедрения тяжелых загрязнений через зеркало грунтовых вод;

- разработать феноменологическую математическую фильтрационно–диффузионную модель распространения высоко– и слабоминерализован-

ных растворов в неоднородных водоносных пластах; на основе вычислительных экспериментов исследовать особенности фильтрационно–диффузионного процесса на быстрой и медленной стадиях распространения загрязнения;

– разработать общую математическую модель взаимосвязанных гидродинамических и массообменных процессов в системе "скважина – пласт – имплозионная камера" при имплозионной обработке призабойной зоны пласта с учетом перемещения камеры при упругом растяжении кабель–троса; на основе компьютерного моделирования исследовать механизм гидроударного воздействия на призабойную зону и дать оценку влияния технологических параметров имплозионного устройства на амплитуду, частоту и продолжительность ударных волн.

Диссертационная работа построена так, чтобы решению каждой из сформулированных задач посвящался либо раздел соответствующей главы, либо отдельная глава.

**Методика исследования.** В ходе решения задач, возникающих при выполнении диссертационной работы, широко использовался метод вычислительного эксперимента на ПЭВМ. С этой целью разработаны и уточнены численные методы теории разностных схем, решения интегральных и обыкновенных дифференциальных уравнений, и проведены многовариантные многопараметрические расчеты.

#### **Научная новизна результатов исследования, выносимых на защиту.**

1) На основе компьютерного моделирования показано существование подвижных и неподвижных структур в поле скоростей суммарного потока при двухфазной многокомпонентной фильтрации в пластах сложного строения. Возникновение и развитие структур является результатом взаимодействия подвижных скачков кусочно–непрерывных функций – водонасыщенности и концентрации загустителя – с границами разрывов абсолютной проницаемости. Структуры непрерывно воздействуют на фильтрационный поток и могут привести к существенному перераспределению водонасыщенности и компонент загустителя в пласте. Интенсивность структур определяется как геометрическими и физическими свойствами коллектора, так и начальной концентрацией загустителя в водном растворе.

2) Поставлена и решена задача расчета фильтрационного процесса и основных характеристик разработки слоисто–неоднородных пластов при отсутствии и наличии подошвенной воды при размещении горизонтальных нагнетательных и добывающих скважин в различных слоях пласта. Показано, что при отсутствии подошвенной воды интегральные характери-

стики фильтрационного процесса незначительно зависят от расположения нагнетательной и добывающей ГС. При наличии подошвенной воды в пластах, образованных слоями с хорошей гидродинамической взаимосвязью, нагнетательную горизонтальную скважину следует размещать в водосодержащем слое.

3) Поставлена и решена задача расчета процесса двухфазной фильтрации в зонально–неоднородном пласте, вскрытом горизонтальными скважинами. На основе вычислительных экспериментов показано, что с увеличением длины скважин их дебит нелинейно возрастает, а календарное время разработки пласта нелинейно убывает. Текущая обводненность скважины практически не зависит от ее длины и близка к обводненности вертикальной скважины, за исключением безводного периода последней. Величины конечной нефтеотдачи и суммарного объема воды, закачанной в пласт за время его разработки, для горизонтальных и вертикальных скважин отличаются несущественно.

4) Построена математическая модель процесса пятикомпонентной фильтрации при вытеснении нефти водой с образованием подвижных высоковязких гидрогелевых оторочек за счет химической реакции, протекающей между двумя гелеобразующими компонентами при их движении в пласте. Разработаны эффективные методы численного решения двумерных задач. На основе компьютерного моделирования показана высокая эффективность гидрогелевого воздействия на слоисто–неоднородный пласт по сравнению с обычным и полимерным заводнением.

5) Построены новые математические одноуровневая и двухуровневая модели процесса циклического заводнения трещиновато–пористых пластов для случаев малых блоков и блоков произвольного размера. Разработаны численные модели, на основе которых изучен механизм повышения нефтеотдачи при циклическом вытеснении нефти водой. Показано, что работа упругих сил повышает интенсивность массообмена между трещинами и блоками, а различие фазовых проницаемостей в блоках и трещинах приводит к тому, что при повышении давления в блоки поступает преимущественно вода, а при его понижении в трещины вытесняется преимущественно нефть. Получены оценки оптимальных периодов воздействия, которые согласуются с промысловыми экспериментальными данными.

6) Построена математическая фильтрационная модель миграции тяжелых неорганических и углеводородных загрязнений в водоносных пластах сложной структуры. В результате ее обобщения на случай распространения высоко– и слабоминерализованных растворов получена фильтрационно–диффузионная модель. Проведен анализ общих свойств решения. С

учетом полученной априорной информации разработаны эффективные численные методы решения двумерных задач миграции пятна загрязнения в вертикальном разрезе пласта. Показано, что при любом начальном распределении рассола на "быстрой" стадии его миграции фильтрационно-диффузионная модель и модель двухфазной фильтрации дают качественно и количественно близкие результаты. Принципиальное отличие наблюдается на "медленной" стадии. В фильтрационной модели она заканчивается полным расслоением фаз, а в фильтрационно-диффузионной модели на "медленной" стадии происходит постепенное уменьшение размеров ядра загрязнения за счет контактного массообмена и конвективно-молекулярной диффузии вплоть до полного исчезновения рассола.

7) Разработана общая математическая модель взаимосвязанных гидродинамических и массообменных процессов в системе "скважина – пласт – имплозионная камера" при имплозионной обработке призабойной зоны пласта с учетом перемещения камеры при упругом растяжении кабель-троса. На основе компьютерного моделирования исследован механизм гидроударного воздействия на призабойную зону и проведен анализ влияния технологических параметров имплозионного устройства на амплитуду, частоту и продолжительность ударных волн. Показано, что в каждой конкретной ситуации может быть определен оптимальный размер камеры, при котором достигается максимальная степень имплозионного воздействия на пласт.

**Достоверность** полученных в работе теоретических результатов следует из того, что они основаны на общих законах и уравнениях механики сплошных сред и обеспечиваются строгими математическими выводами, оценками, выбором численных методов, высокая эффективность которых при построении численной модели обусловлена использованием априорной информации о свойствах решения, сопоставлением решений задач, полученных различными методами, качественным и количественным совпадением теоретических результатов с экспериментальными данными и с результатами работ других авторов.

**Практическая ценность.** Полученные в диссертационной работе результаты расширяют и углубляют теоретические знания о процессах двухфазной многокомпонентной фильтрации в слоисто-неоднородных, зонально-неоднородных и трещиновато-пористых нефтяных пластах, о миграции тяжелых рассолов и углеводородов в водоносных пластах сложной структуры, а также о механизмах взаимосвязанных имплозионных процессов в системе "скважина – пласт – имплозионная камера", и имеют широкий спектр приложений на практике.

Исследованные в главе 1 подвижные и неподвижные структуры, формирующиеся в поле скоростей фильтрационного потока, объясняют многие эффекты, связанные с нетривиальным перераспределением водонасыщенности и концентраций химреагентов в задачах двухфазной фильтрации.

Решение задачи §1.4.2 о размещении горизонтальных скважин в слоисто–неоднородном пласте с подошвенной водой, показавшее целесообразность вскрытия нагнетательной скважиной водосодержащего слоя, а добывающей – наиболее удаленного от подошвы продуктивного слоя, легло в основу нового способа разработки [5], зарегистрированного в Государственном реестре изобретений.

Новая математическая модель §1.3.1 фильтрации химически реагирующих смесей с образованием подвижной высоковязкой гидрогелевой оторочки непосредственно в пластах сложной структуры и подход §1.3.5 к оптимизации методов увеличения нефтеотдачи при гидрогелевом заводнении могут быть использованы для оценки объемов закачиваемых в пласт гелеобразующих компонентов и связанных с этим затрат. Соответствующее математическое программное обеспечение для расчета двухфазной многокомпонентной фильтрации в пластах сложного строения, вскрытых системой вертикальных произвольно расположенных нагнетательных и добывающих скважин, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ [12].

Математические модели циклического воздействия на трещиновато–пористые пласты и результаты решения соответствующих задач главы 2, равно как и разработанные для этого численные модели и компьютерные программы, могут быть использованы при проектировании разработки месторождений трудноизвлекаемых нефтей.

Представленные в главе 3 результаты исследований фильтрационного и фильтрационно–диффузионного переноса тяжелых неорганических и органических жидкостей в пресноводных горизонтах сложной структуры могут быть полезны при экспресс–прогнозе экологического состояния водоносных пластов, подвергшихся загрязнению, а также при оценке качества питьевой воды на водозаборных скважинах и эффективности искусственных гидродинамических барьеров, создаваемых посредством закачки в пласт пресной воды, для предотвращения интрузионного потока загрязнения.

Разработанная в главе 4 математическая модель имплозионного воздействия на призабойную зону пласта может быть полезна при выборе технологических параметров камеры в зависимости от предполагаемых характеристик гидроудара (амплитуды, частоты и продолжительности



ударных волн), для оценки возможного перемещения камеры при упругом растяжении кабель–троса и длины образующихся в коллекторе трещин.

На основе численного решения задач подземной гидромеханики создан программный комплекс–тренажер "АРМАРИС" [11], ориентированный на разработчика–исследователя нефтяных месторождений и предназначенный для проведения вычислительных экспериментов на ПЭВМ. Пакет "АРМАРИС" предоставляет широкие возможности для проведения научных исследований. Он использовался в Казанском государственном университете, в Учебном Центре ОАО "Самаранефтегаз", в Альметьевском нефтяном институте на курсах повышения квалификации специалистов–нефтяников, а также в учебном процессе студентов соответствующих специализаций.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы по мере их получения докладывались и обсуждались на ежегодных итоговых научных конференциях Казанского государственного университета (1995–2004), на научно–практической конференции "Разработка нефтяных месторождений горизонтальными скважинами" (Альметьевск, 1996), на семинаре–дискуссии "Концепция развития методов увеличения нефтеизвлечения" (Бугульма, 1996), на Международном семинаре "Нелинейное моделирование и управление" (Самара, 1997), на I–ом Международном Симпозиуме "Liquid–Liquid Two–Phase Flow and Transport Phenomena" (Antalya, Turkey, 1997), на XIV сессии Международной Школы по моделям механики сплошной среды (Жуковский, 1997), на научно–практической конференции "Приоритетные методы увеличения нефтеотдачи пластов и роль супертехнологий" (Бугульма, 1997), на Международном семинаре "Нелинейное моделирование и управление" (Самара, 1998), на научно–практической конференции VI международной специализированной выставки "Нефть, газ – 99" (Казань, 1999), на Международной конференции "Environmental Mathematical Modeling and Numerical Analysis" (Rostov–on–Don, 1999), на Международной конференции "Modern Approaches to Flows in Porous Media", посвященной П.Я. Плубариновой–Кочиной (Moscow, 1999), на II–ом Международном Симпозиуме "Protection of Groundwater from Pollution and Seawater Intrusion" (Bari, Italia, 1999), на научно–методической конференции "Экологические проблемы гидрогеологии. VIII Толстихинские чтения" (Санкт–Петербург, 1999), на II–ом Международном Симпозиуме "Multiphase Flow and Transport Phenomena" (Antalya, Turkey, 2000), на Международной конференции "Tracers and Modelling in Hydrogeology" (Liege, Belgium, 2000), на Международном семинаре "Нелинейное моделирование и управление" (Самара, 2000), на XV сессии Международной Школы по моделям механики сплошной среды (Санкт–Петербург, 2000), на Международном Се-

минаре "Супервычисления и математическое моделирование" (Саров, 2001), на научно–практической конференции "Новые идеи поиска, разведки и разработки нефтяных месторождений" (Казань, 2000), на IV республиканской научной конференции "Актуальные экологические проблемы республики Татарстан" (Казань, 2000), на Всероссийской конференции "Математическое моделирование и проблемы экологической безопасности" (Абрау–Дюрсо, 2000), на VIII–ом Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике (Пермь, 2001), на научно–практической конференции VIII Международной Выставки "Нефть, газ. Нефтехимия – 2001" (Казань, 2001), на научно–практической конференции "Новейшие методы увеличения нефтеотдачи пластов – теория и практика их применения" (Казань, 2001), на Всероссийской конференции "Современные проблемы гидрогеологии и гидрогеомеханики" (Санкт–Петербург, 2002), на Международном Симпозиуме "Visualization and Imaging in Transport Phenomena" (Antalya, Turkey, 2002), на XIV Международной конференции "Computational Methods in Water Resources" (Delpht, Netherlands, 2002), на XII–ом Европейском симпозиуме "Повышение нефтеотдачи пластов. Освоение трудноизвлекаемых запасов нефти" (Казань, 2003), на научном семинаре кафедры геогидрологии, гидрологии и экологии Делфтского технологического университета (Geohydrology Hydrology & Ecology department Faculty of Civil Engineering and Geosciences Delpht University of Technology) под руководством С.М. Хасанизаде (S.M. Hassanizadeh), (Delpht, 2002), на семинарах отделов теории фильтрации, механики пористых сред, отделения механики в НИИ математики и механики Казанского государственного университета.

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 35 научных статьях, в патенте, в двух авторских свидетельствах и двух монографиях. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников, содержит 318 страниц сквозной нумерации, в том числе 15 таблиц, 76 рисунков; список литературы насчитывает 175 наименований.

### **Краткое содержание работы**

Во **введении** отмечается актуальность темы, формулируются цель и положения, выносимые на защиту. Приводится краткий обзор работ, имеющих отношение к излагаемым результатам. Дается краткий анализ структуры и содержания диссертации.

**Глава 1**, состоящая из трех разделов, посвящена исследованию процессов двухфазной многокомпонентной изотермической фильтрации в слои-

сто–неоднородных и зонально–неоднородных нефтяных пластах, вскрытых горизонтальными или вертикальными скважинами.

В *разделе 1.1* речь идет о специфических особенностях двухфазных двухкомпонентных фильтрационных течений, осложненных массообменными перетоками между слоями и наличием включений и зон с различными свойствами пористой среды.

Большинство гидродинамических моделей фильтрационных процессов в нефтяных пластах базируется на теории подземной гидрогазодинамики, основы которой были заложены фундаментальными работами Р. Викофа и Г. Ботсета, Д.А. Эфроса, С. Баклея и М. Леверетта, М. Маскета и М. Мереса, Л. Рапопорта и В. Лиса. В дальнейшем развитие моделей двухфазной многокомпонентной фильтрации и их приложение к решению различных практических задач нашли свое отражение в работах М.Г. Алишаева, Г.А. Бабаляна, Г.И. Баренблатта, К.С. Басниева, М.Г. Бернардинера, Г.Т. Булгаковой, В.Я. Булыгина, В.А. Данилова, В.М. Ентова, Ю.П. Желтова, А.Ф. Зазовского, П.Т. Зубкова, В.В. Кадета, Р.М. Каца, А.Н. Коновалова, А.В. Костерина, Г.В. Кудрявцева, Б.И. Леви, А.Б. Мазо, А.И. Никифорова, М.Д. Розенберга, Л.П. Рыбицкой, В.М. Рыжика, Э.В. Скворцова, М.Л. Сургучева, В.Б. Таранчука, Ф.Д. Турецкой, К.М. Федорова, А.Я. Хавкина, И.А. Чарного, А.Н. Чекалина, J.H. Abou–Kassem, T. Ertekin, J.E. H essert, G.R. King и многих других.

В §1.1.1 приводятся уравнения двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей (вода – нефть) в рамках крупномасштабного приближения без учета капиллярных эффектов, силы тяжести и сжимаемости пористой среды и фаз:

$$\operatorname{div} \mathbf{V} = 0, \quad \operatorname{div}(\mathbf{V}f) + m \frac{\partial S}{\partial \tau} = 0, \quad \mathbf{V} = \mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2 = -\sigma \cdot \nabla P, \quad (1)$$

$$\sigma = K \cdot K^*, \quad K^* = K_1^* / \mu_1 + K_2^* / \mu_2, \quad f = K_1^* / (\mu_1 K^*) \quad (2)$$

где  $\mathbf{V}$  – суммарная скорость фильтрации,  $S$  – водонасыщенность,  $P$  – давление,  $\tau$  – время,  $K$  – абсолютная проницаемость,  $m$  – динамическая пористость,  $\mu_i$ ,  $\mathbf{V}_i$ ,  $K_i^*$  – вязкость, скорость и относительная фазовая проницаемость  $i$ -ой фазы (нижние индексы «1» и «2» относятся к воде и нефти соответственно),  $f$  – доля воды в потоке (функция Баклея–Леверетта). При моделировании фильтрационного процесса использовались кубические зависимости относительных фазовых проницаемостей  $K_i^*$  от насыщенности.

Дана постановка граничных и начальных условий на примере фильтрации в вертикальном разрезе слоисто–неоднородного пласта, вскрытого горизонтальными добывающей и нагнетательной скважинами. Скважины

моделируются галереями, вскрывающими те слои, в которых они расположены.

В §1.1.2 излагаются методы решения системы дифференциальных уравнений (1), (2) относительно искомых функций водонасыщенности и давления. Для решения уравнения переноса насыщенности  $S$  используется схема А.Н. Чекалина (Чекалин А.Н., Кудрявцев Г.В., Михайлов В.В. Исследование двух- и трехкомпонентной фильтрации в нефтяных пластах. Казань: Изд-во КГУ, 1990). Поскольку в рассматриваемых задачах основной объем вычислений связан с вычислением давления, то с целью разработки программного обеспечения, позволяющего проводить расчеты в режиме реального времени, для решения эллиптического уравнения относительно функции  $P$  предложен новый итерационный метод [2, 7, 10, 28] с высокой скоростью сходимости итераций (как правило, 2 – 3 итерации).

В §1.1.3 на простейших примерах двухслойного пласта с различными абсолютными проницаемостями  $K_i$  и толщинами  $H_i$  слоев и трехслойного пласта, содержащего слабопроницаемое включение, исследуется взаимодействие скачков насыщенности с границами разрыва проницаемости.

На основе анализа результатов расчетов установлено существование подвижных и неподвижных структур в поле скоростей суммарного потока  $\mathbf{V}$  [14, 18]. Характерным признаком структур является изменение направления вертикальной составляющей вектора  $\mathbf{V}$  в узкой области коллектора на противоположное, так что профили скорости в структурах аналогичны профилям обычной волны, см. рис. 1.

Возникновение и развитие структур является результатом взаимодействия подвижных переднего и заднего скачков водонасыщенности с границами разрывов абсолютной проницаемости  $K$ . Особые точки пересечения линии скачка функции  $S$  с границами разрыва функции  $K$  обозначены на рисунке через  $x_s^{(1)}$  и  $x_s^{(2)}$ . Линия гребня ( $V_z = 0$ ) задней структуры пересекает границу слоев в точке  $x_s^{(2)}$ , и, как видно из рисунка, при  $0 < x < x_s^{(2)}$  поток направлен из верхнего менее проницаемого

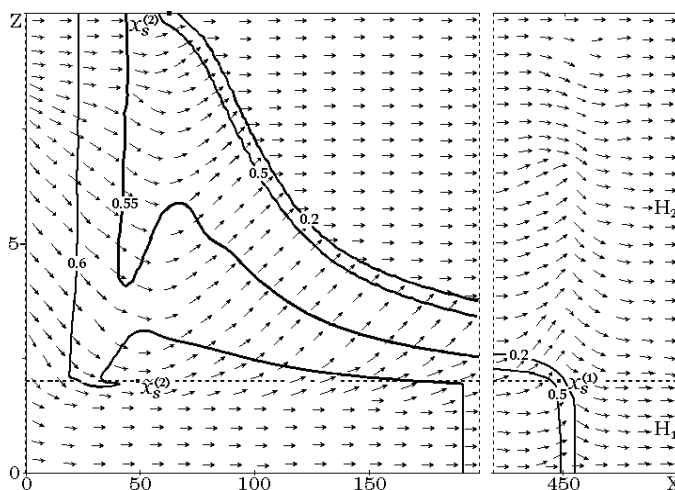


Рис. 1. Поле направлений вектора скорости  $\mathbf{V}$  и изолинии водонасыщенности  $S$  в увеличенных фрагментах вертикального разреза двухслойного пласта ( $H_1=2$ ,  $H_2=8$  м,  $K_1=1$ ,  $K_2=0.2$  мкм<sup>2</sup>) при обычном заводнении на один из моментов времени

слоя в нижний, а справа от точки  $x_s^{(2)}$  на участке  $x_s^{(2)} < x < x_s^{(1)}$  (вплоть до переднего скачка функции  $S$ ), переток на границе имеет обратное направление. Передняя  $S$ –структура перемещается по области коллектора, в которой присутствуют только нефть, а задняя – движется по области, насыщенной обеими фазами. Такие  $S$ –структуры непрерывно воздействуют на фильтрационный поток и могут привести к существенному перераспределению насыщенности. Интенсивность структур определяется геометрическими и физическими свойствами коллектора.

В §1.1.4 изучается влияние тонких высоко– или слабопроницаемого слоев на фильтрационный процесс в слоистом пласте и исследуются эффекты, обусловленные воздействием подвижных структур. Показано, что  $S$ –структуры усиливают межслойный массообмен, уменьшающий неравномерность выработки слоев. Наличие в трехслойном пласте слоя с высокой проницаемостью приводит к более неравномерному вытеснению нефти водой и более низкой нефтеотдаче, чем присутствие слабопроницаемого слоя [20].

§1.1.5 посвящен изучению влияния расположения горизонтальных скважин по вертикальному разрезу слоисто–неоднородного пласта на фильтрацию при отсутствии и наличии подошвенной воды. Показано, что в первом случае процесс фильтрации в основном определяется строением пласта и незначительно зависит от расположения нагнетательной и добывающей ГС.

Совершенно иная картина наблюдается, когда нижний слой содержит подвижную воду. При наличии достаточно хорошей гидродинамической связи между слоями во всех вариантах (в том числе, и при расположении нагнетательной ГС в подошвенном слое, отделенном от других слоев тонкой слабопроницаемой перемычкой), в нем происходит вытеснение воды нефтью, поступающей из вышележащих слоев. Этот эффект обусловлен действием подвижных  $S$ –структур, образующихся на границах перемычки, влияние которых распространяется вплоть до подошвы пласта. При этом наиболее оптимальным (по максимуму конечной нефтеотдачи) является размещение нагнетательной ГС в водосодержащем слое [5].

С уменьшением проницаемости перемычки (при прочих равных условиях) степень затухания  $S$ –структур в ней постепенно усиливается наряду с уменьшением глубины проникновения нефтяной фазы в нижний слой.

В §1.1.6 исследован процесс вытеснения нефти водой в пласте зонально–неоднородной структуры, вскрытом горизонтальными скважинами. На основе численных расчетов установлено, что процесс двухфазной фильтрации существенно зависит как от строения зонально–неоднородного пласта, так и от длины вскрывающих его горизонтальных сква-

жин. Дебит скважин нелинейно возрастает с увеличением их длины, при этом аналогичная зависимость календарного времени разработки пласта является нелинейно убывающей. Безводная нефтеотдача несколько выше у вертикальных скважин, чем у ГС. Прорыв воды в добывающую горизонтальную скважину происходит одновременно на различных участках ее ствола и зависит как от длины скважины, так и характера неоднородности абсолютной проницаемости не только в окрестности скважины, но и во всем пласте в целом. Текущая обводненность скважины практически не зависит от ее длины и близка к обводненности вертикальной скважины, за исключением безводного периода последней. Величины конечной нефтеотдачи и суммарного объема воды, закачанной в пласт за время его разработки, для горизонтальных и вертикальных отличаются несущественно.

В *разделе 1.2* рассматриваются метод физико–химического воздействия на слоисто–неоднородные пласты и изучаются особенности двухфазного трехкомпонентного фильтрационного процесса на примере вытеснения нефти водой с использованием полимерных оторочек. В предположении равновесности адсорбции полимера в §1.2.1 приведено уравнение переноса его подвижной концентрации  $C$  :

$$m \frac{\partial}{\partial t} \left( CS + \frac{a}{m} \right) + \operatorname{div} (Cf \mathbf{V}_1) = 0, \quad (3)$$

которое в случае фильтрации воды, нефти и загустителя дополняет систему (1), (2). Даны формулировки граничных и начальных условий для случая вертикального разреза слоисто–неоднородного пласта. В расчетах сорбированная масса загустителя, связанная с подвижной его концентрацией  $C$ , определялась изотермой сорбции Генри:  $a(S, C) = \Gamma SC$ , где  $\Gamma$  – коэффициент Генри. Вязкость  $\mu_1$  полимерного раствора при его фильтрации в пористом пласте вычислялась с учетом ее зависимости как от величин  $C$  и  $a$ , так и от абсолютной проницаемости  $K$  :

$$\mu_1 = \mu_1^0 (1 + \alpha_\mu \cdot C) \cdot \left[ 1 + (A - B \cdot K) \cdot a(S, C) / a(S^*, C_{\max}) \right],$$

где  $C \in [0, C_{\max}]$ ,  $S \in [S_*, S^*]$ ;  $S_*$  и  $S^*$  – связанная и предельная водонасыщенности,  $C_{\max}$  – максимальное значение концентрации  $C$ ,  $\mu_1^0$  – вязкость воды без загустителя,  $A$ ,  $B$  и  $\alpha_\mu$  – эмпирические коэффициенты, полученные по экспериментальным данным.

Параграф §1.2.2 содержит краткое изложение известного численного метода расчета концентрации полимера, предложенного А.Н. Чекалиным. В §1.2.3 изучается взаимодействие скачков насыщенности и концентрации с границами разрыва абсолютной проницаемости. Показано, что по сравнению с двухкомпонентными течениями, двухфазные трехкомпонентные фильтрационные потоки в слоисто–неоднородных пластах обладают еще

более сложным характером, обусловленным строением коллектора, перетоками жидких фаз (в том числе, и растворенного в воде загустителя) между слоями и наличием подвижных и неподвижных структур в поле скоростей суммарного потока [14, 18]. В этом случае возникновение и развитие структур является результатом взаимодействия подвижных скачков двух кусочно–непрерывных функций – водонасыщенности  $S$  и концентрации  $C$  загустителя – с границами разрывов абсолютной проницаемости в особых точках  $x_s^{(1)}$ ,  $x_s^{(2)}$ ,  $x_{c,0}^{(1)}$ ,  $x_c^{(1)}$ ,  $x_{c,2}^{(2)}$ , см. рис. 2. Непрерывное воздействие  $S$  – и  $C$  – структур на фильтрационный поток может существенно изменить распределения функций  $S$  и  $C$  в пласте. Интенсивность структур определяется не только геометрическими и физическими свойствами коллектора, но и начальной концентрацией загустителя в водном растворе.

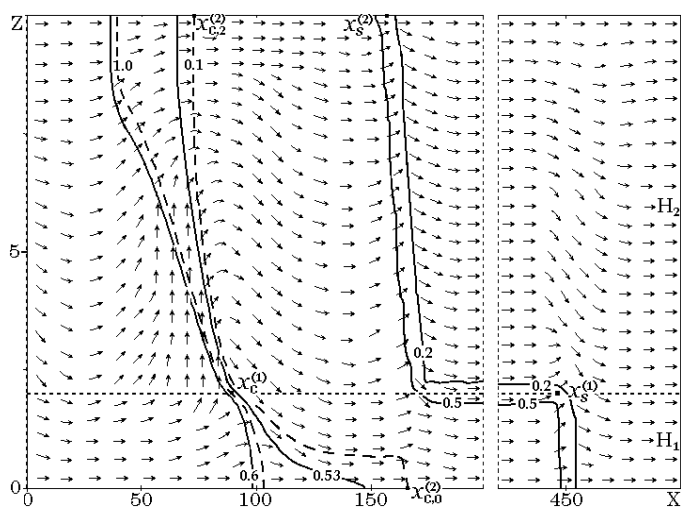


Рис. 2. Поле направлений вектора скорости  $V$ , изолиний функций  $S$  и  $C$  (сплошные и пунктирные линии, соответственно) в увеличенных фрагментах двухслойного пласта при полимерном заводнении на один из моментов времени

В §1.2.4 анализируются особенности фильтрационного процесса в свете возникающих  $S$  – и  $C$  –структур и оценивается эффективность полимерного заводнения по сравнению с обычным вытеснением нефти водой. Показано, что при полимерном вытеснении происходит интерференция подвижных структур обоих типов, и в результате их усиленного воздействия передний фронт насыщенности в различных слоях пласта становится практически вертикальным. С появлением заднего фронта оторочки в фильтрационном потоке порождаются новые  $C$  –структуры, которые стремятся разорвать оторочку на части, и в области их влияния ее толщина минимальна.

На основе анализа характеристик разработки пластов делается вывод о том, что по сравнению с обычным заводнением полимерное вытеснение позволяет повысить конечную нефтеотдачу пласта наряду с сокращением времени его разработки и снижением водонефтяного фактора. Однако значительная разница между коэффициентами нефтеотдачи слоев с различной абсолютной проницаемостью все же сохраняется [3, 20].

В §1.2.5 исследуется влияние полимерного заводнения на характеристики разработки пластов слоистой структуры, вскрытых горизонталь-

ными скважинами, при их размещении в различных слоях и при различных объемах закачиваемого полимерного раствора. В рассматриваемом случае относительно "тонких" пластов нефтеотдача мало зависит от расположения горизонтальных скважин и в основном определяется структурой коллектора.

**Раздел 1.3** посвящен теоретическому изучению второго метода физико-химического воздействия (гидрогелевое заводнение), приводящего к задачам двухфазной пятикомпонентной фильтрации.

В §1.3.1 приведена математическая модель [2, 3, 14, 18, 25], содержащая два блока уравнений: гидродинамический, представленный уравнениями (1), (2), и физико-химический, включающий в себя уравнения химической реакции между последовательно закачиваемыми в пласт химреагентами, фильтрационного массопереноса загустителя и гелеобразующих компонентов:

$$\delta_R = \kappa_+ [C_1]^{v_1} [C_2]^{v_2} - \kappa_- [C]^v, \quad \frac{\partial mS(C+a)}{\partial t} + \operatorname{div}(C\mathbf{V}_1) = Mv\delta_R, \quad (4)$$

$$\frac{\partial mS(C_i + a_i)}{\partial t} + \operatorname{div}(C_i\mathbf{V}_1) = -M_i v_i \delta_R, \quad i = 1, 2. \quad (5)$$

Уравнения (4), (5) получены при следующих предположениях. Во-первых, смесь состоит из двух компонентов  $R_1$  и  $R_2$  с молекулярными массами  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M = M_1 + M_2$  и массовыми концентрациями  $C_1$ ,  $C_2$ , реакция между которыми  $v_1 R_1 + v_2 R_2 = vR$  определяет концентрацию  $C$  загустителя  $R$ . Во-вторых, состав смеси (водной фазы) влияет на фильтрацию только через зависимость вязкости водной фазы от концентрации загустителя  $\mu_1 = \mu_1(C)$ . Первое соотношение (4) определяет величину  $\delta_R$  – разность чисел актов реакции в прямом и обратном направлениях за единицу времени;  $\kappa$  – константа химической реакции;  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a$  – массы компонентов в сорбированном состоянии, связанные с подвижными концентрациями изотермами сорбции:  $a_1 = a_1(S, C_1)$ ,  $a_2 = a_2(S, C_2)$ ,  $a = a(S, C)$ . В третьих, для того, чтобы второй химреагент мог догнать первый, необходимо, чтобы сорбция первого была либо больше сорбции второго, либо необратимой.

В этом же параграфе проводится конкретизация модели (1), (2), (4), (5) на случай фильтрации в вертикальном разрезе слоисто-неоднородного пласта в рамках приближения локального химического равновесия, которое позволяет представить первое соотношение (4) в виде:  $C_1^{v_1} C_2^{v_2} / C^v = \kappa$ .

Параграф 1.3.2 посвящен вопросам численной реализации уравнений переноса концентраций гелеобразующих компонентов и загустителя [2]. Приводится описание алгоритма совместного расчета водонасыщенности, давления, концентраций гелеобразующих компонентов и гидрогеля.



В §1.3.3 на основе численных расчетов доказано существование подвижных  $S$ – и  $C$ –структур в поле скоростей суммарного потока, возникновение и развитие которых в данном случае обусловлено взаимодействием подвижных скачков водонасыщенности и концентрации гидрогеля с границами разрывов абсолютной проницаемости [14, 18]. Показано, что еще более сложная, чем при полимерном заводнении, картина распределения фаз и компонентов в слоистых пластах обусловлена именно этими подвижными структурами, возникающими в полях скоростей и перемещающимися в области переменной насыщенности и концентрации гидрогеля, рис. 3. Дается анализ особенностей фильтрационного течения с учетом подвижных структур при формировании, перемещении и разрыве гидрогелевой оторочки.

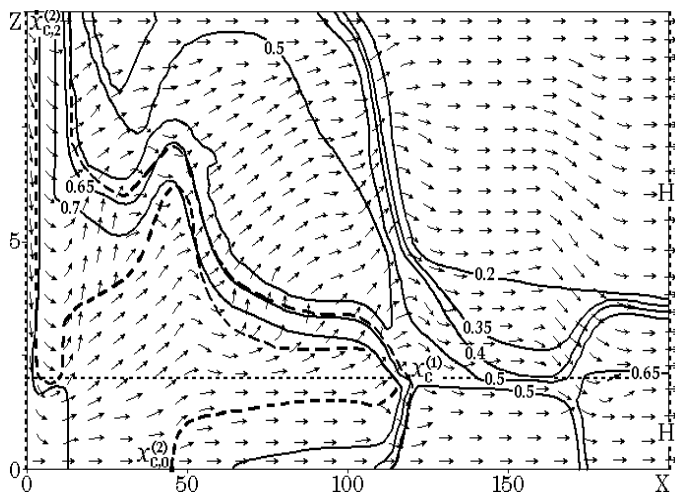


Рис. 3. Поле направлений вектора скорости  $\mathbf{V}$ , распределение водонасыщенности  $S$  (сплошные линии) и граница оторочки гидрогеля (пунктирные линии) в двухслойном пласте на момент ее разрыва

В §1.3.4 изучается влияние подвижных гелевых оторочек на фильтрационные процессы в слоисто–неоднородных пластах и характеристики их разработки. Показано, в частности, что за счет применения гидрогелей можно добиться значительного выравнивания выработанности слоев с различной проницаемостью и повысить нефтеотдачу пласта [2, 3, 25].

§1.3.5 демонстрирует возможности методов компьютерного моделирования и теории планирования экстремальных экспериментов при решении различных задач оптимизации гидрогелевого заводнения слоисто–неоднородных пластов. Рассмотрен пример определения оптимальных объемов оторочек гелеобразующих компонентов при заданном объеме суммарной оторочки, закачиваемой в слоисто–неоднородный пласт.

Таблица 1

№	$t^o$	$\eta^o$	$\eta_1^o$	$\eta_2^o$	$\eta_3^o$	$\eta_4^o$	$\eta_5^o$
1	1.877	47.0	27.8	60.6	51.6	59.2	45.0
2	0.955	52.7	30.5	63.1	53.9	62.0	43.9
3	<b>0.877</b>	<b>56.4</b>	<b>35.5</b>	<b>65.4</b>	<b>55.6</b>	<b>66.8</b>	<b>50.0</b>

В §1.3.6 дано сравнение (см. табл.1) методов обычного (1), полимерного (2) и гидрогелевого (3) заводнения на примере пласта, состоящего из пяти слоев одинаковой двухметровой толщины с разными абсолютными проницаемостями 0.1, 1.6, 0.4, 1.2, 0.2 мкм<sup>2</sup>. В таблице представлены

ными проницаемостями 0.1, 1.6, 0.4, 1.2, 0.2 мкм<sup>2</sup>. В таблице представлены

значения нефтеотдачи отдельных слоев  $\eta_i^o$  ( $i=\overline{1,5}$ ), пласта  $\eta^o$  и время  $t^o$  его разработки, выраженное в долях порового объема пласта. Приведенные данные иллюстрируют высокую эффективность гидрогелевой технологии для повышения нефтеотдачи слоисто–неоднородных коллекторов [3, 25].

**Глава 2** посвящена вопросам математического и численного моделирования нестационарных процессов при циклическом вытеснении нефти водой из трещиновато–пористых пластов.

По–видимому, одними из первых рассмотрели задачу циклического воздействия на пласт Г.Г. Тумашев и В.М. Фомин. Первая модель неустановившейся фильтрации однородной жидкости в средах с двойной пористостью была предложена Г.И. Баренблаттом, Ю.П. Желтовым и И.Н. Кочиной в предположении о том, что макроскопическим потоком в блоках можно пренебречь, а переток между блоками и трещинами пропорционален разнице давлений в порах и трещинах. В дальнейшем этот подход был применен А.А. Боксерманом, Ю.П. Желтовым, А.А. Кочешковым и Б.В. Шалимовым к исследованию процесса капиллярной пропитки и для описания циклического вытеснения нефти водой. В работе О.Э. Цинковой предлагается описать механизм выравнивания насыщенности при циклическом воздействии с помощью гистерезиса фазовых проницаемостей. Для получения и обработки кривых восстановления давления на скважинах на трещиновато–пористых пластах, Ю.М. Молокович построил усовершенствованную модель Баренблатта–Уоррена–Рута, учитывающую неравновесность фильтрационного потока по давлению и скорости фильтрации. Однако эффект снижения обводненности при циклическом воздействии достаточно долго не имел своего должного объяснения в рамках теории двухфазной фильтрации.

В данной главе рассматриваются трещиновато–пористые пласты со структурой двух типов: I) двумодальные (вложенные) среды, в которых в каждой из обеих систем блоков и трещин можно определить макроскопические фильтрационные потоки, и II) пласты, образованные пористыми блоками, окруженными трещинами. В этом случае блоки не образуют сплошной среды, и в них макроскопические фильтрационные потоки отсутствуют.

В *разделе 2.1* выполнено построение моделей двухфазной фильтрации в пластах II–го типа. В §2.1.1 для изучения механизма вытеснения нефти водой в пластах, образованной блоками небольшого размера, и для оценки влияния периода циклического воздействия на величину нефтеотдачи предложена математическая модель [8, 14, 24], включающая в себя уравнения двухфазной фильтрации в трещинах и блоках с учетом массообмена между ними, который происходит за счет упругих сил:

$$\beta \frac{\partial P}{\partial \tau} + \operatorname{div} \mathbf{V} = q_{\Sigma}, \quad m \frac{\partial S}{\partial \tau} + \beta_1^* S \frac{\partial P}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\mathbf{V}f) = \lambda q_{\Sigma}, \quad q_{\Sigma} = -\bar{\beta} \frac{\partial P}{\partial \tau}, \quad (6)$$

$$\bar{m} \frac{\partial \bar{S}}{\partial \tau} + \bar{\beta}_1^* \bar{S} \frac{\partial P}{\partial \tau} = -\lambda q_{\Sigma}, \quad \mathbf{V} = -\frac{K}{\mu_1} K^* \nabla P, \quad \lambda = \begin{cases} f(S), & \partial P / \partial \tau > 0 \\ \bar{f}(\bar{S}), & \partial P / \partial \tau < 0 \end{cases}, \quad (7)$$

где  $P$ ,  $S$ ,  $\mathbf{V}$  – давление, водонасыщенность, скорость фильтрации суммарного потока в трещинах,  $f(S)$  – доля воды в суммарном перетоке,  $q_{\Sigma}$  – интенсивность суммарного перетока из блока в трещины;  $\beta_i^*$ ,  $\mu_i$ ,  $K_i^*$  – упругоемкость среды с  $i$ -ой фазой, относительная фазовая проницаемость и вязкость  $i$ -ой фазы («1» – вода, «2» – нефть, черта сверху – параметры блока);  $\varepsilon$ ,  $\beta_c$ ,  $\beta_i$  – коэффициенты упругоемкости трещин, поровой среды и  $i$ -ой фазы;  $K^* = K_1^* + \mu K_2^*$ ,  $f(S) = K_1^* / K^*$ ,  $\mu = \mu_1 / \mu_2$ ,  $\beta = \beta_1^* S + \beta_2^* (1 - S)$ ,  $\beta_i^* = \varepsilon + m \beta_i$ ,  $\bar{\beta}_i^* = \beta_c + \bar{m} \beta_i$ ,  $\bar{\beta} = \bar{\beta}_1^* \bar{S} + \bar{\beta}_2^* (1 - \bar{S})$ .

Модель (6), (7) записана в предположении мгновенного выравнивания насыщенности в каждом блоке и локального равновесия по давлению в блоках и трещинах, интенсивность перетоков между которыми каждой из фаз в отдельности определяется в зависимости от направления суммарного перетока. Относительные фазовые проницаемости в блоках и в трещинах определяются соответственно кубическими и линейными функциями от  $\bar{S}$  и  $S$ .

В этом же параграфе приводится модель двухфазной фильтрации в среде с двойной пористостью (пласт со структурой I-го типа), включающая уравнения (6) в трещинах и уравнения вытеснения нефти водой в блоках:

$$\bar{\beta} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \tau} + \operatorname{div} \bar{\mathbf{V}} = -q_{\Sigma}, \quad \bar{\mathbf{V}} = -\frac{\bar{K}}{\mu_1} \bar{K}^* \nabla \bar{P}, \quad (8)$$

$$\bar{m} \frac{\partial \bar{S}}{\partial \tau} + \bar{\beta}_1^* \bar{S} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\bar{\mathbf{V}} \bar{f}) = -\lambda q_{\Sigma}, \quad \lambda = \begin{cases} f(S), & P > \bar{P} \\ \bar{f}(\bar{S}), & P < \bar{P} \end{cases}. \quad (9)$$

Макроскопический переток  $q_{\Sigma}$  между ними пропорционален разности давлений в блоках и трещинах:  $q_{\Sigma} = -\bar{\alpha}(P - \bar{P})$ ,  $\bar{\alpha}$  – коэффициент обмена.

Поскольку такие одноуровневые модели не позволяют детально изучить массовые потоки жидкостей между трещинами и блоками, с этой целью в §2.1.2 предложена новая двухуровневая модель [9, 14], предназначенная для исследования особенностей процесса вытеснения нефти водой из блоков произвольных размеров. Она учитывает массообмен между трещинами и блоками и включает в себя две взаимосвязанные системы уравнений различных уровней. На *внешнем уровне* (в трещинах) процесс вытеснения нефти водой описывается уравнениями (6) с источниками  $q_{\Sigma}$  массы

$$q_{\Sigma} = \frac{1}{\nu_b} \iint_{\Gamma_s} W_n d\gamma = \frac{1}{\nu_b} \iiint_{\nu_b} \bar{\beta} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \tau} dv, \quad (10)$$

являющимися интегральными характеристиками решения внутренней задачи для блоков, где  $\mathbf{W}$  – скорость суммарного фильтрационного потока в данном блоке,  $\nu_b$ ,  $\Gamma_s$  – его объем и граница контакта с трещинами. Процессы в каждом отдельном блоке (на *внутреннем уровне*) описываются уравнениями двухфазной фильтрации, но без источников в правой части:

$$\bar{\beta} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \tau} + \operatorname{div} \mathbf{W} = 0, \quad \mathbf{W} = -\frac{\bar{K}}{\mu_1} \bar{K}^* \nabla \bar{P}, \quad \bar{m} \frac{\partial \bar{S}}{\partial \tau} + \bar{\beta}_1^* \bar{S} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\mathbf{W} \bar{f}) = 0 \quad (11)$$

Интенсивность перетоков отдельно воды и нефти определяется по знаку производной от давления в блоках на соответствующей границе:

$$\lambda q_{\Sigma} = \begin{cases} f \cdot q_{\Sigma}, & \partial P / \partial \tau \geq 0 \\ \nu_b^{-1} \iint_{\Gamma_s} W_n d\gamma, & \partial P / \partial \tau < 0 \end{cases} \quad (12)$$

Построенные одноуровневые и двухуровневая модели представляют собой системы существенно нелинейных дифференциальных уравнений. Для их решения применяются разностные методы, излагаемые в **разделе 2.2**. Описание численной одноуровневой модели [8] дано в §2.2.1 на примере системы уравнений (6), (8), (9) для одномерной задачи фильтрации в радиальном пласте в окрестности нагнетательной (или добывающей) скважины, работающей в периодическом режиме. В §2.2.2 приведена численная двухуровневая модель [9, 10] для случая регулярно расположенных прямоугольных блоков.

В **разделе 2.3** представлены результаты вычислительных экспериментов, выполненных с целью исследования особенностей фильтрационных течений в трещиновато–пористых пластах со структурой I–го и II–го типа.

С помощью построенных моделей в §2.3.1 и §2.3.2 дано принципиальное объяснение механизма повышения нефтеотдачи трещиновато–пористых пластов при нестационарном воздействии [8, 14, 24]. Во–первых, работа упругих сил повышает интенсивность массообмена между трещинами и блоками. Во–вторых, различие фазовых проницаемостей в блоках и трещинах приводит к тому, что в блоки при повышении давления поступает преимущественно вода, а при его понижении в трещины вытесняется преимущественно нефть. Интенсивность такого массообмена зависит от величины периода циклического воздействия, см. рис. 4.

Анализ [9, 14] результатов расчетов в §2.3.2 по двухуровневой модели позволяет сделать вывод о том, что степень выработанности блоков зависит от их расположения в пласте. При отсутствии сдвига фаз наиболее эффективно происходит выработка блоков, расположенных не только вблизи

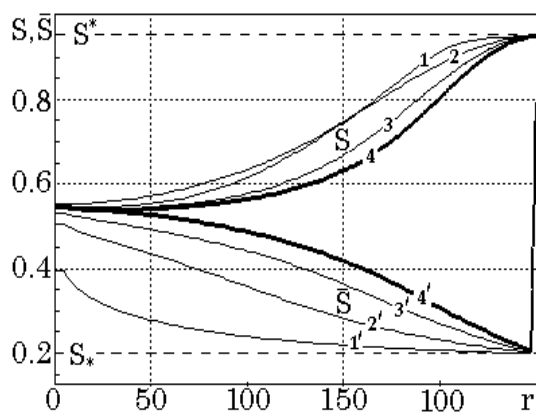


Рис. 4. Распределение насыщенности вдоль радиального пласта в трещинах (1 – 4) и в блоках (1' – 4') на конец разработки при различных значениях периода циклического воздействия:  $T = 720, 192, 96, 18$  час. Расчеты по одноуровневой модели (6), (7)

выми экспериментальными данными при расчетах по всем трем моделям.

**Глава 3** посвящена построению математических моделей и исследованию на их основе распространения тяжелых неорганических и углеводородных загрязнений в водоносных пластах сложной структуры.

Существует несколько способов моделирования переноса рассолов фильтрационным потоком. В простейшей модели Гибена–Герцберга рассол и пресная вода считаются несмешивающимися жидкостями, на границе контакта которых выполняются гидростатические условия; диффузионный перенос между рассолом и водой отсутствует; не учитывается неустойчивость миграции разноплотностных жидкостей. Второй подход применяется для исследования фильтрации слабоконцентрированных растворов и основывается на дисперсионной модели, включающей в себя уравнения конвективной диффузии в пористой среде, в которых дисперсионный массовый поток описывается линейным законом Фика. В нелинейной дисперсионно–диффузионной модели переноса рассолов используется нелинейный закон Фика с полу-

нагнетательной скважины, но и в окрестности добывающей. При этом в средней части пласта образуется область, в которой нефтеотдача блоков остается достаточно низкой. Наибольший эффект вытеснения нефти из блоков достигается при асинхронном режиме работы скважин.

Проведенное сравнение результатов вычислительных экспериментов по двухуровневой и одноуровневой моделям показывает, что все они имеют качественно одинаковый характер. Показано [8, 14] существование оптимальных значений периода циклического воздействия на пласт (см. рис. 5), согласующихся с промысловыми экспериментальными данными при расчетах по всем трем моделям.

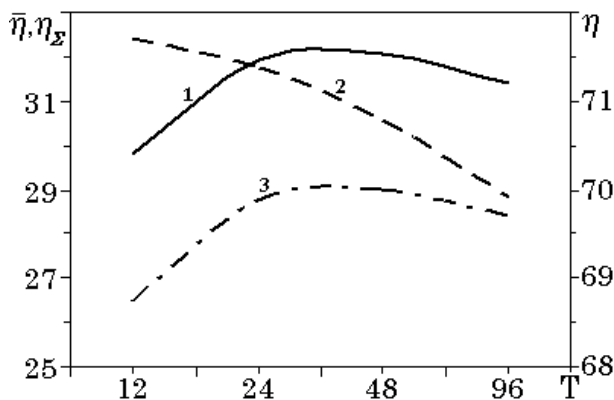


Рис. 5. Зависимости коэффициентов нефтеотдачи  $\eta_{\Sigma}$ ,  $\eta$ ,  $\bar{\eta}$  пласта (1), трещин (2) и блоков (3) от периода  $T$  (час) при циклическом изменении дебита нагнетательной скважины. Расчеты по двухуровневой модели (6), (10) – (12)

эмпирическими зависимостями дисперсионного потока от градиента концентрации, в том числе и с учетом молекулярной диффузии. Эта модель справедлива лишь для анализа устойчивых ситуаций, когда процесс пальцеобразования, обусловленный гравитационной неустойчивостью, отсутствует или им можно пренебречь. Еще один подход, основанный на распараллеливании вычислительного процесса на многопроцессорных ЭВМ, базируется на построении "универсальной" трехмерной модели в рамках уравнений многофазной фильтрации с учетом всех действующих факторов.

Указанным выше вопросам посвящены работы многих российских и зарубежных авторов: Н.Н. Веригина, В.С. Голубева, А.Г. Егорова, Р.З. Даутова, В.М. Ентова, А.В. Костерина, В.А. Мироненко, П.Я. Полубариновой–Кочиной, В.Г. Румынина, Э.В. Скворцова, М.Г. Храмченкова, А.Н. Чекалина, A.L. Baehr, J. Bear, J.P. Boris, M.Y. Corapcioglu, S.M. Hassanizadeh, J. Morris, R.J. Schotting и др.

В *разделе 3.1* рассматриваются вопросы моделирования миграции тяжелых высокоминерализованных неорганических водных растворов (рассолов). В §3.1.1 приводится физическое описание процесса и его схематизация. В §3.1.2 в предположении отсутствия диффузии на границе контакта пресной воды и рассола в рамках схемы двухфазной фильтрации с фазовыми проницаемостями  $K_i^*$ , линейно зависящими от насыщенности пористой среды рассолом (1–ая фаза) и водой (2–ая фаза), построена математическая фильтрационная модель [4, 7, 22, 26, 27] миграции рассола, учитывающая неустойчивый характер движения при внедрении тяжелой жидкости в легкую:

$$\operatorname{div} \mathbf{V} = 0, \quad m \frac{\partial S}{\partial \tau} + \operatorname{div} \mathbf{V}_1 = 0, \quad \mathbf{V} = -\frac{K^* K}{\mu_2} (\nabla P + \rho \mathbf{g}), \quad \mathbf{V}_1 = f \mathbf{V} + K \Psi \rho_{1-2} \mathbf{g}, \quad (13)$$

где  $\mathbf{V}$  – суммарная скорость фильтрации,  $S$  – насыщенность пористой среды рассолом,  $P$  – давление,  $K$  – абсолютная проницаемость,  $m$  – динамическая пористость,  $\rho_i$ ,  $\mu_i$ ,  $\mathbf{V}_i$ ,  $K_i^*$  – плотность, вязкость, скорость и относительная фазовая проницаемость  $i$ -ой фазы;  $C_0$  – объемная концентрация соли в рассоле;  $K_1^* = S$ ,  $K_2^* = 1 - S$ ,  $K^* = \mu K_1^* + K_2^*$ ,  $f = \mu K_1^* / K^*$ ,  $\Psi = f K_2^*$ ,  $\mu = \mu_2 / \mu_1$ ,  $\rho = \rho_1 f + (1 - f) \rho_2$ ,  $\rho_{1-2} = \rho_1 - \rho_2$ ,  $C = S C_0$ .

Поскольку граничные условия для уравнения переноса насыщенности рассола должны быть заданы на тех частях границы, где рассол втекает в пласт, формулировка этих условий требует изучения априорной информации о функции насыщенности, поведение которой на границах связано с решением общей задачи внутри всей области фильтрации. Проведенный в §3.1.3 анализ общих свойств решения, в частности, показал [4, 22, 23, 26,

27], 1) что высококонцентрированный раствор и вода могут двигаться в различных направлениях, вплоть до противоположного; 2) что на границах разрыва абсолютной проницаемости в пластах сложной структуры могут возникать подвижные скачки, которые могут влиять на интенсивность внедрения рассола в пласт; 3) что при определенных условиях в областях с более высокой проницаемостью в неоднородном пласте могут формироваться неподвижные пятна рассола.

Постановка граничных условий [4, 15, 22, 27] для давления и насыщенности с учетом полученной априорной информации дана в §3.1.4 для двух основных типов двумерных задач: I) интрузии рассола и II) его гравитационного внедрения в водоносный горизонт через зеркало грунтовых вод как при наличии, так и при отсутствии инфильтрационного потока пресной воды заданной интенсивности на участке кровли пласта.

**Раздел 3.2** посвящен разработке численных методов и алгоритмов [7, 28] решения поставленных нелинейных задач. Основная трудность численного решения уравнения (13) переноса рассола связана с правильным выбором аппроксимации "вверх по потоку" для конвективных членов, поскольку потоки фаз и суммарный поток двухфазной смеси могут иметь противоположные направления. Для решения этой проблемы используется априорная информация о свойствах решения на линиях разрыва абсолютной проницаемости. Алгоритм также учитывает ограниченность области ядра рассола, так что вычисление потоков загрязнения проводятся только в этой области.

В **разделе 3.3** изучаются особенности фильтрационного распространения основного ядра загрязнения (области, занятой рассолом) при относительно высоких скоростях фильтрационного или инфильтрационного потоков, когда концентрация в ореоле, окружающем это ядро, достаточно мала по сравнению с насыщенностью рассола.

Апробация [13, 15, 28] модели (см. рис. 6) выполнена в §3.3.1 на данных лабораторных исследований (**Schincariol R.A., Schwartz F.W.** An experimental investigation of variable density flow and mixing in ho-

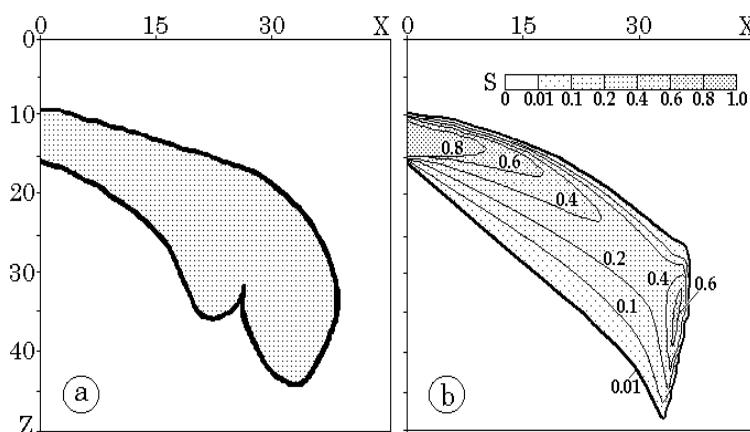


Рис. 6. Интрузия рассола в образец однородной пористой среды. **a** – эксперимент (**Schincariol R.A. & Schwartz F.W.**, 1990), **b** – расчет по модели (13)

mogeneous and heterogeneous media // Water Resour. Res. 1990. – V.26. – N10. – P. 2317–2329). Видно, что расчеты хорошо согласуются с экспериментом.

Здесь же проведено сравнение численного решения по фильтрационной модели (13) с численным решением (**Schotting R.J.** Mathematical Aspects of Salt Transport in Porous Media. – Amsterdam: Centrum voor Wiskunde en Informatica, 1998.– 187p.) задачи о движении первоначально вертикальной свободной границы между двумя разноплотностными жидкостями (рассолом и пресной водой) в горизонтальном пласте, образованном двумя слоями одинаковой толщины различной проницаемости при  $K_2/K_1 = 5$ , см. рис. 7. Качественно полученные результаты согласуются между собой. При этом, в отличие от решения **Schotting R.J.**, численное решение по модели (13) является устойчивым (при выполнении условия Куранта) как при малых, так и больших временах.

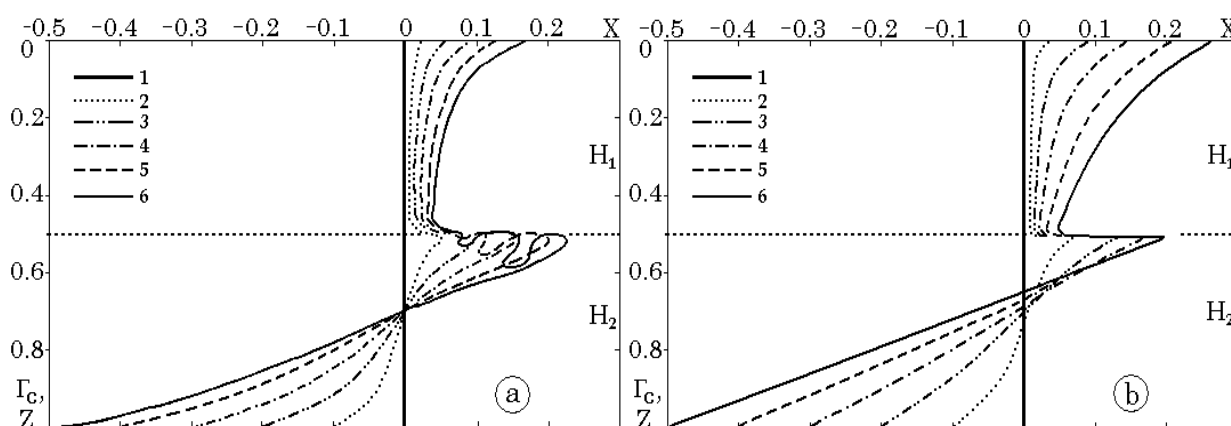


Рис. 7. Процесс перемещения первоначально вертикальной границы раздела между рассолом и пресной водой: **a** – решение (**Schotting R.J.**, 1998) задачи о свободной границе при  $t = 0, 0.141, 0.309, 0.521, 0.775, 1$  (кривые 1–6); **b** – расчет по модели (13) при  $t = 0, 0.091, 0.227, 0.491, 0.809, 1$  (кривые 1–6)

Отметим, что программный комплекс **FILTRA**, разработанный на основе модели двухфазной фильтрации (13), использовался в Санкт–Петербургском университете для сравнения численных решений, полученных с помощью различных пакетов программ. Результаты, опубликованные в работе (**Коносавский П.К., Румынин В.Г., Синдаловский Л.Н.** Особенности численного моделирования фильтрации потоков переменной плотности // Современные проблемы гидрогеологии и гидрогеомеханики. Сб. докл. конф. – Санкт–Петербург, 2002. – СПб.: Изд–во СПб. ун–та, 2002. – С. 533–550) свидетельствуют о том, что модели двухфазных потоков в случае наличия языкообразования "обладают преимуществами в сравнении с дисперсионными моделями, использование которых приводит к резкому завышению размеров зон загрязнения".

В §3.3.2 исследуется влияние непроницаемых барьеров и слабопроницаемых включений на миграцию пятна рассола при различных сценариях



загрязнения неоднородного водоносного пласта с учетом и без учета инфильтрации и бокового потока. Показано [6, 7, 13, 15, 22, 24, 26], что в процессе фильтрации можно выделить "быструю" (начальную) и "медленную" (конечную) стадии. В течение быстрой стадии основная масса загрязнения проходит через высокопроницаемые зоны и накапливается на подошве пласта. Медленная стадия может заканчиваться либо уходом подвижного пятна загрязнения из пласта, либо переходом на квазистационарный режим.

Присутствие непроницаемых вертикальных барьеров приводит к накоплению рассола вблизи их границ. При определенном соотношении между величинами суммарного потока и плотностей фаз ядра загрязнения могут перестать двигаться, т.е. их границы не изменяются во времени. Неподвижное замкнутое ядро может образоваться не только у непроницаемой подошвы, но и в высокопроницаемом слое, расположенном над менее проницаемым. При этом внутри таких неподвижных квазистационарных ядер происходит вращательное движение рассола, рис. 8.

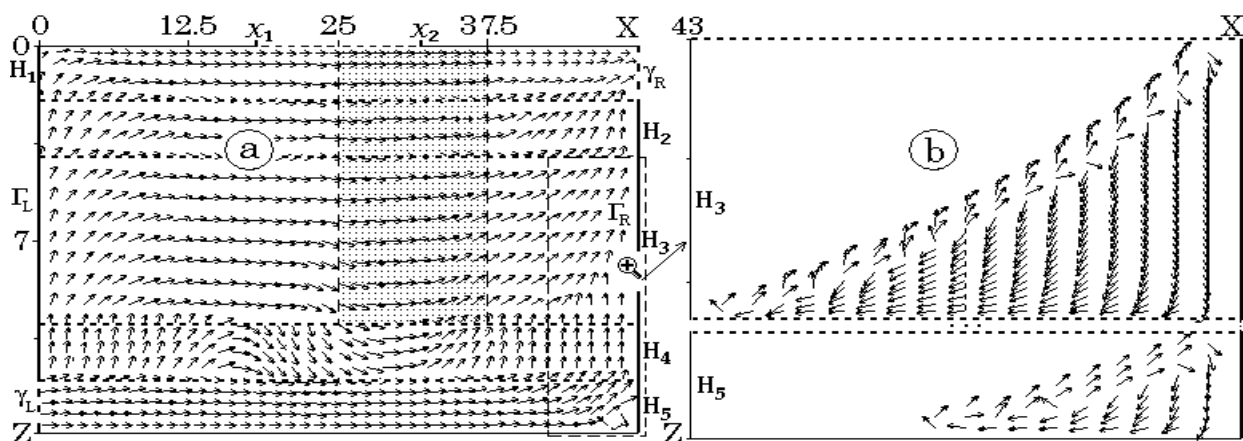


Рис. 8. Поля направлений скоростей  $\mathbf{V}$  в анизотропном пятислойном пласте (а) и  $\mathbf{V}_1$  в увеличенном его фрагменте внутри неподвижных ядер (б) на квазистационарной стадии.  $K_{x,1,2,3,4,5}=1.1, 0.6, 1.2, 0.14, 1.4$ ,  $K_{z,1,2,3,4,5}=1.1, 0.6, 1.2, 0.12, 0.2 \text{ мкм}^2$

Неподвижное ядро иного типа может сформироваться в слоистом пласте при определенном соотношении между величиной интрузионного потока морской воды, значением интенсивности  $q_i$  постоянного инфильтрационного потока, разницей плотностей фаз и перепадом давления по пласту при отборе пресной воды на водозаборной галерее. При этом фильтрация сопровождается образованием зон вращательного движения морской воды внутри ядра (рис. 9), обусловленных наличием разрыва абсолютной проницаемости на границе слоев, показанной пунктиром на рисунке.

Ядра данного типа не являются замкнутыми, поскольку они примыкают к проницаемой границе, и в них происходит одновременное втекание морской воды в нижней части ядра и вытекание из его верхней части.

Интересно отметить, что при интрузии, происходящей на фоне сезонных колебаний инфильтрации относительно постоянного среднего годового значения  $q_i$  ее интенсивности (при котором имеет место квазистационарный режим с образованием неподвижного ядра), рассол может достичь линии водозабора.

В §3.3.3 анализируются структурные эффекты [7, 15, 23, 26, 27] на примерах внедрения рассола через зеркало грунтовых вод на участке  $x_1x_2$  кровли пласта с регулярно расположенными слабопроницаемыми блоками, проницаемость которых на два порядка меньше проницаемости окружающих их «трещин», рис. 10. Хорошо видно, что структура пласта обуславливает фильтрационное течение, при котором скорости  $\mathbf{V}$  и  $\mathbf{V}_1$  могут иметь различные направления, формируются «вихревые» зоны, а на границах разрыва проницаемости возникают отраженные скачки насыщенности  $S$ . Проникновение части рассола в блоки на быстрой стадии приводит к длительному вторичному загрязнению пласта на медленной стадии из-за оттока рассола из включений.

Наличие квазистационар-

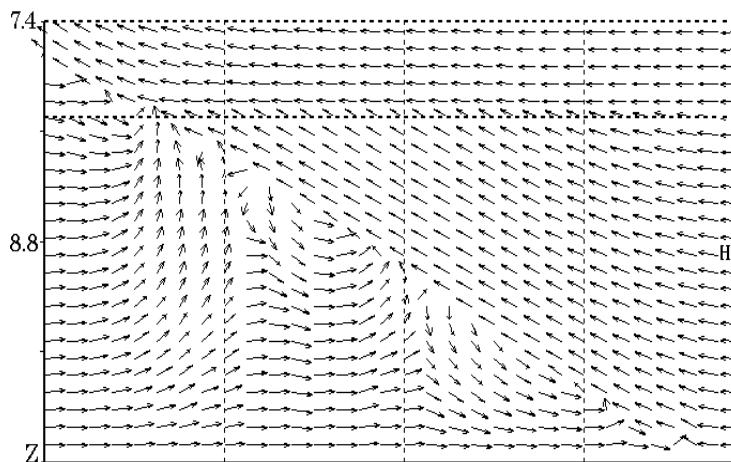


Рис. 9. Поле направлений скоростей  $\mathbf{V}$  в увеличенном фрагменте трехслойного пласта внутри неподвижного ядра на квазистационарной стадии интрузии морской воды.  $K_{1,2,3}=1.0, 3.0, 0.2$  мкм<sup>2</sup>

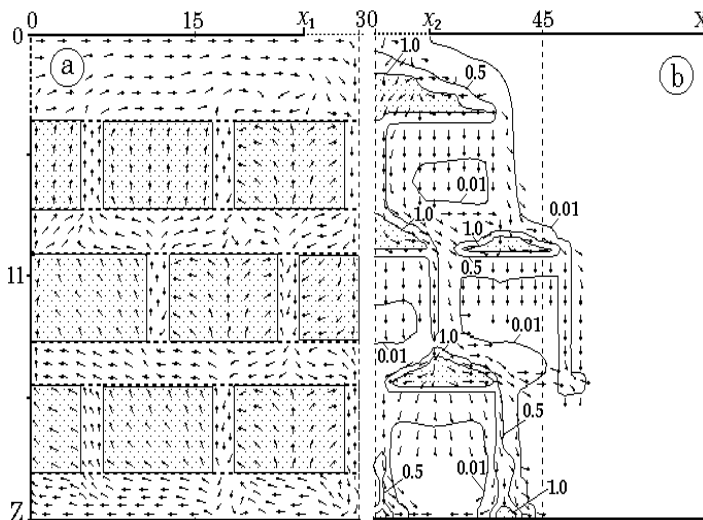


Рис. 10. Один из моментов быстрой стадии загрязнения симметричного "трещиновато-пористого" пласта: **a** – поле направлений скорости  $\mathbf{V}$  в левом, **b** – изолинии функции  $S$  и поле направлений вектора  $\mathbf{V}_1$  в правом фрагментах коллектора

ных режимов с образованием неподвижных зон, содержащих ядра рассола, может служить оценкой времени завершения быстрой стадии. При учете диффузии неподвижные ядра либо не смогут сформироваться, либо должны существовать лишь в течение конечного времени.

Для учета процессов, происходящих в переходной зоне между рассолом и пресной водой, в **разделе 3.4** дано построение фильтрационно-диффузионной модели, позволяющей изучать миграцию как высоко-, так и слабоконцентрированных рассолов.

В §3.4.1 уточняется схема пятна загрязнения и механизмы массообмена в переходной области между рассолом и водой с учетом языкообразования, приводящего к формированию областей, содержащих одновременно и рассол и воду. В этой части порового пространства имеет место объемный массообмен за счет молекулярной диффузии, что приводит к появлению слабоконцентрированного раствора. В области пласта, в которой рассол отсутствует, изменение концентрации слабоконцентрированного раствора происходит за счет конвективно-молекулярной диффузии. Таким образом, на макроуровне общепринятая величина концентрации  $C$ , равная общему количеству соли в единице элементарного объема, представляет собой две существенно различные составляющие – высококонцентрированную  $C_B = SC_0$  и слабоконцентрированную  $C_c = (1-S)\theta$ , где  $\theta$  – концентрация соли в слабоконцентрированном растворе, перешедшей за счет диффузии соли в воду из рассола;  $C_0 = const$  – начальная объемная концентрация соли в рассоле. Фильтрация первой составляющей происходит в зонах, в которых  $0 < S \leq 1$ , а второй – в зонах  $0 \leq S < 1$ , так что  $C = SC_0 + (1-S)\theta$ . При записи уравнений двухфазной фильтрации учитывается массообмен между фазами, за счет которого происходит уменьшение массы рассола (см. [13, 15, 17]):

$$\operatorname{div} \mathbf{V} = J \frac{\rho_{1-2}}{\rho_2}, \quad m \frac{\partial S}{\partial \tau} + \operatorname{div} \mathbf{V}_1 = -J, \quad J = m \alpha_v \varphi(S)(1-\Theta), \quad (14)$$

Здесь  $\Theta = \theta/C_0$ ;  $\rho_2 = \rho_2^0(1-\Theta) + \rho_1\Theta$  – плотность раствора;  $\rho_2^0$  – плотность пресной воды;  $\rho_{1-2} = (\rho_1 - \rho_2^0)(1-\Theta)$ ;  $J$  – объемное количество рассола, теряемого единицей порового объема в единицу времени за счет объемной диффузии с коэффициентом  $\alpha_v$ , равным произведению коэффициента  $\alpha_c$  контактного массообмена на удельную поверхность границы  $\Gamma(\tau)$  рассола. Поскольку эта поверхность, как правило, не известна, то коэффициент  $\alpha_v$  рассматривается как параметр процесса, который должен быть идентифицирован из опытных данных. В расчетах функция  $\varphi(S) \approx S(1-S)$ .

Изменение концентрации в слабоконцентрированном растворе описывается уравнением диффузии с объемным источником  $J$  в правой части:

$$m \frac{\partial}{\partial \tau} (\Theta(1-S)) + \operatorname{div} \mathbf{W} = J, \quad \mathbf{W} = \Theta \mathbf{V}_2 + m(1-S) D \nabla \Theta. \quad (15)$$

где  $D$  – коэффициент конвективно–молекулярной диффузии.

Спецификой решения этого уравнения является то, что оно существует в области с подвижной границей  $\Gamma(\tau)$  ядра рассола, скорость движения которой связана с поведением и свойствами функции  $S$ . Постановка граничных условий на этой границе  $\Gamma(\tau)$  обсуждается в §3.4.2 для случаев гравитационно–устойчивой («вода над рассолом»)

$$W_n|_{\Gamma(t)} = m\alpha_c(1-S^-)(1-\Theta), \quad \frac{dn}{dt}\bigg|_{\Gamma} = \frac{1}{m} \frac{V_{1,n}^+ - V_{1,n}^- - W_n|_{\Gamma}}{1-S^-}; \quad (16)$$

и неустойчивой («рассол над водой») поверхности контакта фаз:

$$W_n|_{\Gamma(t)} = 0, \quad \frac{dn}{dt}\bigg|_{\Gamma} = \frac{1}{m} \frac{\partial V_{1n}}{\partial S}. \quad (17)$$

где  $\mathbf{n}$  – внешняя нормаль к  $\Gamma$ ,  $V_{1,n}^+ - V_{1,n}^-$  – скачок скорости  $\mathbf{V}_1$  на границе  $\Gamma$ .

Раздел 3.5 посвящен изучению особенностей распространения рассола с учетом диффузии. В §3.5.1 рассматриваются задачи "вода над рассолом" и "рассол над водой" для случаев начальной горизонтальной устойчивой и неустойчивой границ контакта фаз [17]. В примере "рассол над водой" (см. рис. 11) граница контакта на начальной

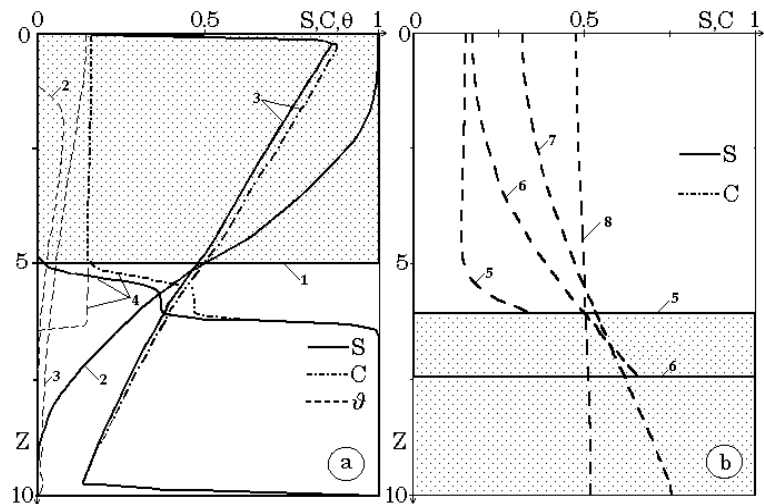


Рис. 11. Распределения насыщенности  $S$ , суммарной концентрации  $C$  и функции  $\Theta$  по вертикальному разрезу однородного пласта (задача "рассол над водой"): **a** – на быстрой и **b** – на медленной стадиях.

1–8 –  $\tau = 0, 11, 24, 75, 90, 2550, 7640$  и  $9300$  сут

стадии достаточно быстро перемещается к кровле пласта от заданного начального положения за счет продвижения струй воды. Одновременно струи рассола движутся в противоположном направлении к подошве пласта. На "медленной" стадии, наступающей после полного оседания рассола на подошву, граница раздела между рассолом и слабоконцентрированным раствором становится устойчивой, и ее перемещение вниз происходит очень медленно за счет контактного массообмена.

В случае первоначально клинообразной границы между рассолом и водой (с основанием, примыкающим к кровле пласта) на быстрой стадии во-

да замещает оседающий рассол из верхней части ядра, и возникающая устойчивая граница "вода–рассол" принимает здесь куполообразную форму. Нижняя граница "рассол–вода" исчезает, и образуется подвижная зона непрерывного изменения насыщенности  $0 < S < 1$ , характеризующая протяженность языков рассола. За счет вытеснения воды рассолом во всем пласте формируется вращательное движение водной фазы.

При ступенчатой начальной границе раздела на быстрой стадии в окрестности каждого из вертикальных участков границы раздела фаз возникает вращательное движение из-за наличия горизонтальной составляющей градиента давления, обусловленной разностью плотностей рассола и водной фазы. Формирование зон вращательного движения при наличии соседних горизонтальных гравитационно–неустойчивых границ раздела ("рассол над водой") приводит к образованию "пальцев" у краев этих границ, рис. 12.

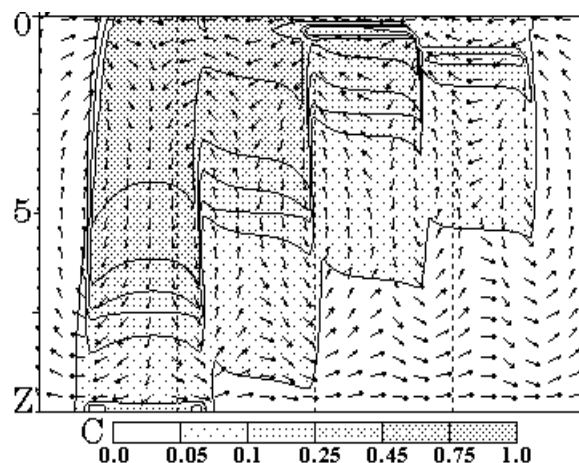


Рис. 12. Поле направлений скорости  $V$  и распределение суммарной концентрации  $C$  рассола в однородном пласте на один из моментов гравитационного оседания пятна с первоначально ступенчатой границей

Фiltrационно–диффузионное распространение пятна рассола на медленной стадии при интрузионном потоке постоянной интенсивности рассматривается в §3.5.2. При определенных соотношениях расходных и диффузионных параметров возникает такая ситуация, когда, начиная с некоторого момента времени, положение ядра практически не меняется, поскольку устанавливается баланс между количеством поступающего в пористый пласт рассола и количеством соли, переходящим за счет диффузии в ореол вокруг ядра.

Вычислительные эксперименты, представленные в §3.5.2 и §3.5.3, демонстрируют также, что в фильтрационно–диффузионной модели неподвижные пятна рассола, образующиеся у границ непроницаемых барьеров, а также в высокопроницаемых зонах пласта, расположенных над менее проницаемыми, на медленной стадии постепенно рассасываются [15, 17].

На основе решения указанных задач по фильтрационной и фильтрационно–диффузионной моделям показано, что на "быстрой" стадии миграции рассола при любом его начальном распределении обе модели дают качественно и количественно близкие результаты. Принципиальное отличие наблюдается на "медленной" стадии. В фильтрационной модели (13) она заканчивается полным расслоением фаз, а в фильтрационно–диффузи-

онной модели (14) – (17) на "медленной" стадии происходит постепенное уменьшение размеров ядра за счет контактного массообмена и конвективно–молекулярной диффузии вплоть до полного исчезновения рассола.

В разделе 3.6 представлена математическая схема [4, 21, 23, 27] распространения тяжелой органической жидкости, построенная в рамках модели двухфазной фильтрации (13). Для тяжелых углеводородных жидкостей имеют место те же постановки математических задач, что и для рассолов. При первичном гравитационном внедрении органической жидкости в силу струйного его характера фазовые проницаемости определяются линейными функциями на переднем фронте ядра загрязнения. Однако на поздней стадии, когда появляется задний фронт, вода фильтруется по каналам, занятым углеводородной жидкостью, так что фазовые проницаемости становятся нелинейными.

Свойства насыщенности, анализ которых дан в §3.6.1, аналогичны свойствам решения в задачах миграции рассола и обобщают их [4, 23].

В §3.6.2 проведен сравнительный анализ процессов фильтрации углеводородного и неорганического загрязнений. Показано, что в качественном отношении эти процессы весьма схожи. Количественная разница между ними состоит в том, что миграция органической жидкости является значительно более долговременной и приводит к формированию остаточного следа загрязнения, обусловленного капиллярными эффектами.

**Глава 4** посвящена математическому моделированию взаимосвязанных гидродинамических и массообменных процессов в системе "скважина – пласт – имплозионная камера" при имплозионной обработке призабойной зоны пласта с учетом перемещения камеры при упругом растяжении троса.

Опытно–промышленному изучению и внедрению технологий имплозионного и комбинированного способов воздействия на пласт посвящены работы А.А. Попова, А.И. Шнирельмана, И.Ф. Садыкова, Ш.Х. Минибаева, А.Р. Мухутдинова и др.

Методы расчета имплозионных процессов, базирующиеся на теории гидравлического удара в скважине, были предложены А.А. Поповым и А.И. Шнирельманом. Однако при этом не учитываются как массообменные перетоки между пластом и скважиной, так и взаимосвязь процессов во всей имплозионной системе. Постановки задач, связанных с расчетом колебаний температуры и давления в скважине при обработке призабойной зоны пласта пороховым газогенерирующим устройством (также без взаимосвязи с пластом), рассматриваются в работах А.В. Балдина, М.М. Пинчука, С.С. Рябова, Г.И. Сухорукова (Научн.–техн. Вестник "Каро-

тажник".–Тверь, 2003.–Вып. 107.– С. 77–86) и В.Д. Крощенко, Н.С. Санасаряна, В.И. Павлова (там же. Вып. 106. – С. 167 – 171).

В состав имплозионной системы (рис. 13) входят следующие элементы: **а)** – пласт толщиной  $h_n$ , пористостью  $m$ , абсолютной проницаемостью  $K$  и пьезопроводностью  $\kappa$ ; **б)** – обсадная колонна скважины радиусом  $r_o$  и глубиной  $H_c$ , в которой к моменту начала имплозионного воздействия находится гидростатический столб воды высотой  $h_o(0) = h_o^0$ , уравновешенный начальным пластовым давлением  $P_n^0$ ; **с)** – имплозионная камера радиусом  $r_k$  и длиной  $L = h_b - h_d$ , которая расположена вблизи забоя и заполнена воздухом при атмосферном давлении  $P_{am}$ ; **д)** – кабель–трос длиной  $L_T = H_c - h_b(0)$ , на котором подвешена камера в скважине.

В разделе 4.1 дано физическое описание имплозии и ее схематизация, на основе которой построена математическая модель [16, 19] трех основных взаимосвязанных процессов: гидродинамического – в трубах, фильтрационного – в пласте и движения камеры за счет упругого растяжения троса:

$$\rho h_d \cdot \Lambda(w_n) = P_{заб} - P_d^-, \quad \rho [h_k - h_d] \cdot L(w_k) = P_k^+ - P_\Gamma, \quad (18)$$

$$\rho L \cdot \Lambda(w_3) = P_d^+ - P_b^-, \quad \rho [h_o - h_b] \cdot \Lambda(w_o) = P_b^+ - P_{am}, \quad (19)$$

$$\Lambda(w_i) = dw_i/d\tau + \zeta_i (Re_i) w_i |w_i| / 4R_i + g, \quad i = n, k, 3, o, \quad (20)$$

$$\frac{dh_o}{dt} = w_o(\tau), \quad h_o(0) = h_o^0; \quad \frac{dh_k}{dt} = w_k, \quad h_k(0) = h_k^0; \quad (21)$$

$$[h_b(\tau) - h_k(\tau)]^\alpha P_\Gamma(\tau) = L^\alpha P_{am}, \quad S_o w_o = S_3 w_3, \quad (22)$$

$$Q_\Phi = S_o w_n = \frac{2\pi K h_n}{\mu} \frac{d}{d\tau} \int_0^\tau (P_n^o - P_{z=0}(s)) \Psi \left( \frac{\pi \kappa}{R_o^2} (\tau - s) \right) ds = S_o w_o + S_k w_k; \quad (23)$$

$$h_d^0(0) = h_k^0, \quad h_b(0) = h_b^0, \quad P_{z=0}(0) = P_n^0, \quad P_\Gamma(0) = P_{am}, \quad (24)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad 0 < y < L_T, \quad \tau > 0, \quad u(y, 0) = 0, \quad \frac{du}{d\tau}(0, \tau) = 0, \quad (25)$$

$$u(0, \tau) = 0, \quad E_T S_T \frac{\partial u}{\partial y}(L_T, \tau) = S_k (P_b^+(\tau) - P_\Gamma(\tau)) - \alpha_c \frac{\partial u}{\partial \tau}(L_T, \tau), \quad (26)$$

$$u_b(\tau) = u(L_T, \tau), \quad h_b(\tau) = h_b^0 - u_b(\tau), \quad w_b(\tau) = \frac{dh_b}{d\tau} = -\frac{du_b}{d\tau}, \quad (27)$$

где  $w_i(\tau)$ ,  $\zeta_i(Re_i)$ ,  $S_i$ ,  $R_i$  – скорость жидкости, коэффициент гидравлического сопротивления, площадь поперечного сечения и гидравлический ра-

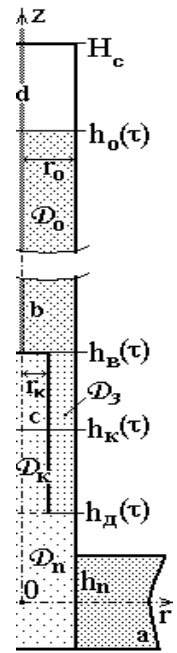


Рис. 13

диус соответствующего участка  $\mathcal{D}_i(\tau)$  труб,  $i = n, k, 3, o$ , (рис. 13);  $Re_i$  – число Рейнольдса потока в  $i$ -ой области;  $h_d(\tau)$ ,  $h_k(\tau)$ ,  $h_b(\tau)$ ,  $h_o(\tau)$  и  $P_{z=0}(\tau)$ ,  $P_\Gamma(\tau)$ ,  $P_d(\tau)$ ,  $P_b(\tau)$ ,  $P_{am}$  – координаты подвижных границ областей  $\mathcal{D}_i(\tau)$  движения жидкости и величины давления на этих границах;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho$  и  $\mu$  – плотность и вязкость жидкости;  $\alpha$  – коэффициент адиабатического расширения газа;  $\Psi(\tau) = 1/\ln(1 + \sqrt{\tau})$  – функция радиального притока;  $y$  – ось с началом на устье скважины при  $z = H_c$ ;  $u(y, t)$  – текущее относительное удлинение троса;  $E_T$ ,  $\rho_T$  и  $S_T$  – модуль упругости, плотность материала и площадь поперечного сечения троса;  $\alpha_c$  – коэффициент сопротивления при движении камеры в жидкости;  $a^2 = E_T/\rho_T$ ;  $w_b(\tau)$  – скорость перемещения имплозионной камеры под действием перепада давления  $(P_b^+(\tau) - P_\Gamma(\tau))$  вне и внутри камеры.

Уравнения (18) – (21) движения в областях с подвижными границами в скважине и камере записаны в предположении несжимаемости жидкости. Соотношение (22), учитывающие изменение давления  $P_\Gamma(\tau)$  в газовом буфере камеры при сжатии (расширении) газа, получено без учета его растворения в воде. Скачки давления  $[P_b] = P_b^+ - P_b^-$ ,  $[P_d] = P_d^+ - P_d^-$ ,  $[P_k] = P_k^+ - P_k^-$  определяются с помощью коэффициентов местных сопротивлений, учитывающих потери давления при сужении (или расширении) потока, его повороте или торможении. Эти коэффициенты являются параметрами модели, которые требуют идентификации на основе экспериментальных данных.

Интегральное уравнение (23), связывающее давление  $P_{z=0}(\tau)$  и объемный расход  $Q_\Phi(\tau)$  жидкости на забое скважины, записано на основе решения задачи фильтрации однородной жидкости в пласте при упругом режиме. Удлинение  $u(y, t)$  кабель–троса, позволяющее определять положение  $h_b(\tau)$  камеры и ее скорость перемещения  $w_b(\tau)$  (27), находится из решения задачи (25), (26) об упругом растяжении (сжатии) стержня.

В разделе 4.2 приведено описание численной модели и итерационного алгоритма расчета имплозионного процесса, на внутреннем уровне которого методом Ньютона из уравнений (18) – (24) по аналогии с [1] находятся гидродинамические характеристики потоков в скважине, камере и пласте, а на внешнем – методом прогонки решается задача (25) – (27).

С помощью вычислительных экспериментов в разделе 4.3 изучены особенности колебательного имплозионного процесса и дана оценка влияния различных параметров на его характеристики. Некоторые результаты [16, 19] для случая неподвижной камеры представлены на рис. 14.



Показано, что первая амплитуда гидроудара в несколько раз может превосходить начальное пластовое давление, см. рис. 14. Характер затухания, количество периодов, амплитуда и частота колебаний в системе "пласт – скважина – имплозионная камера" зависят от размеров камеры, степени сжимаемости газа и абсолютной проницаемости пласта.

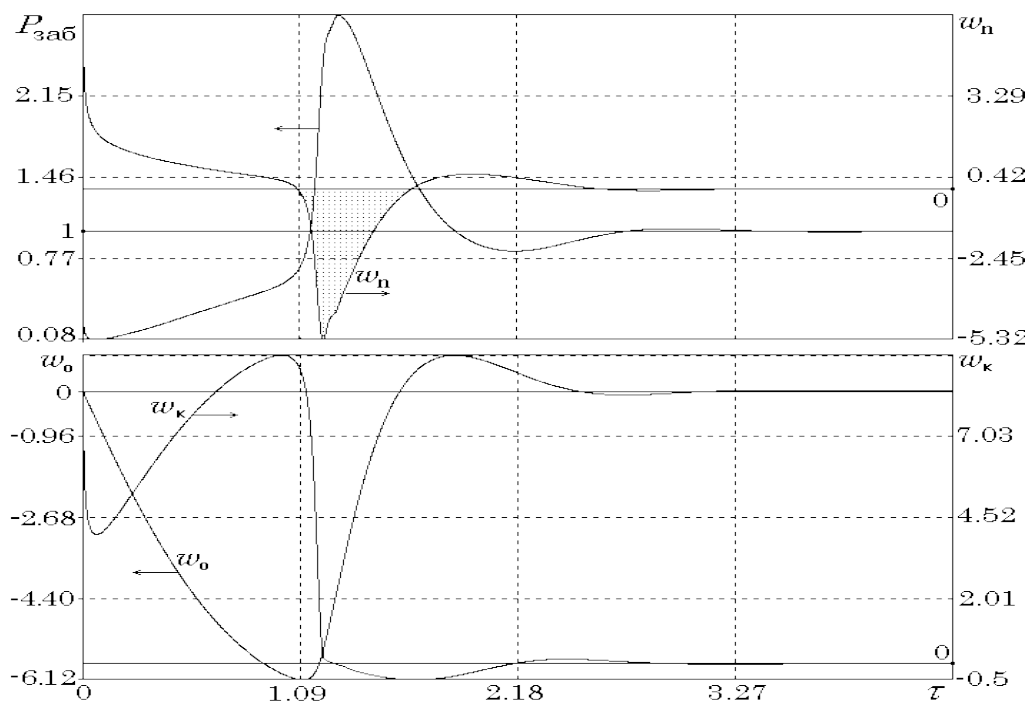


Рис. 14. Зависимости относительного давления  $P_{заб} = P_{z=0}/P_{пл}^0$ , скорости фильтрационного потока  $w_n$  (м/сек) на забое скважины и скоростей  $w_o$ ,  $w_k$  (м/сек) движения жидкости в обсадной колонне и в имплозионной камере от времени  $\tau$

Перемещение камеры за счет удлинения троса (в характерных для практики диапазонах изменения свойств материала троса и коэффициента сопротивления камеры при ее взаимодействии со скважинной жидкостью) может составить несколько метров.

Суммарные объемы жидкости, поступающей из пласта в скважину и из скважины в пласт, характеризующие способность очистки призабойной зоны при имплозионном воздействии, в основном определяются приемистостью пласта и размерами имплозионной камеры. Величины этих объемов мало отличаются при небольших размерах камеры, но разница между ними возрастает с увеличением ее размера.

Длина трещин гидроразрыва, образующихся при имплозии в призабойной зоне, оцениваемая по методике Ю.П. Желтова (Желтов Ю.П. Деформации горных пород. – М.: Недра, 1966), составляет порядка нескольких десятков сантиметров.

Показано, что в каждой конкретной ситуации максимальная степень имплозионного воздействия на пласт достигается за счет оптимального подбора размеров камеры (рис. 15).

**Заключение** содержит результаты и выводы проделанной работы. Здесь же намечены перспективы дальнейших исследований по теме диссертации.

#### **Связь исследований с научными программами.**

Работа выполнялась в отделе механики НИИ математики и механики им. Н.Г. Чеботарева и на кафедре прикладной математики Казанского государственного университета в рамках проектов МНТЦ (№ 714, № 1565) и INTAS (№ 99–1810), грантов АН РТ: № 08–8.3–21/2001 (Ф), № 08–8.3–55/2002 Ф(08), № 08–8.3–56/2002 Ф(08), № 08–8.3–57/2002 Ф(08), № 08–8.3–58/2002 Ф(08).

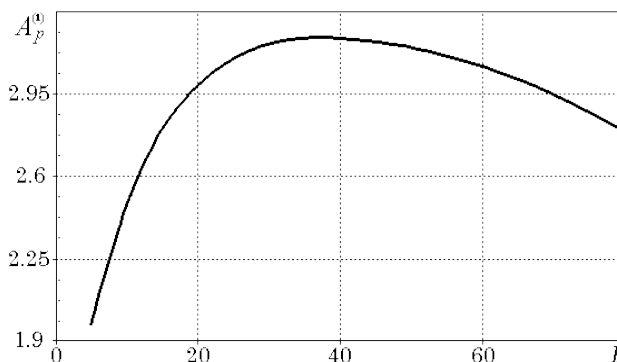


Рис. 15. Зависимость максимальной амплитуды  $A_p^{(1)}$  относительного забойного давления  $P_{заб}$  от длины камеры  $L$  (м)

**Благодарности.** Автор с благодарностью и признательностью вспоминает своего первого учителя М.А. Пудовкина. Я признателен своим учителям А.Н. Чекалину, А.В. Костерину, А.Н. Саламатину, оказавшим большое влияние на выбор тематики исследований. Неоценимое значение имели их советы и замечания, равно, как консультации и помощь коллег Ю.А. Волкова, А.Г. Егорова, И.Ф. Садыкова, Э.В. Скворцова, М.Г. Храмченкова. Весьма плодотворным было сотрудничество с Р. Скоттингем (R.J. Schotting), приведшее к новым постановкам задач. Всем им автор выражает свою искреннюю благодарность.

#### **Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

1. Конюхов В.М. Дисперсные потоки в нефтяных скважинах. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1990. – 137 с.
2. Конюхов В.М. Образование и фильтрация оторочки загустителя в слоистых неоднородных пластах / В.М. Конюхов, А.В. Костерин, А.Н. Чекалин // Изв. РАЕН. Сер. МММИУ. – 1997. – Т.1. – № 1. – С. 84 – 109.
3. Конюхов В.М. Фильтрация химически реагирующих смесей в слоистых пластах / В.М. Конюхов, А.В. Костерин, А.Н. Чекалин // Тр. XIV сессии Межд. школы по моделям механики сплошной среды (Жуковский, Россия, 17 – 24 августа, 1997). – Москва, 1998. – С. 97 – 103.
4. Конюхов В.М. Моделирование распространения тяжелых жидких загрязнений в слоистом водоносном пласте / В.М. Конюхов, М.Г. Храмченков, А.Н. Чекалин // ВАНТ. Сер.: Матем. моделирование физич. процессов. – М., 1998. – Вып.4. – С. 36 – 43.

5. Конюхов В.М. Способ разработки нефтяного пласта с подстиляющей водой / Ю.А. Волков, В.М. Конюхов, А.Н. Чекалин / Патент № 2112870 на изобретение. – РОСПАТЕНТ. – Заявка № 96113809 от 8 июля 1996г. – Зарегистрирован в Гос. реестре изобретений 10 июня 1998г.
6. Конюхов В.М. Моделирование распространения тяжелых жидких загрязнений в анизотропном неоднородном водоносном пласте с учетом инфильтрации / В.М. Конюхов, А.В. Костерин, А.Н. Чекалин // Материалы научн.–методич. конф. "Экологические проблемы гидрогеологии. VIII Толстихинские чтения" (Санкт–Петербург, 16 – 17 ноября, 1999). – 1999. – С. 190 – 195.
7. Конюхов В.М. Численное моделирование миграции тяжелого загрязнения в неоднородном водоносном пласте / В.М. Конюхов, А.Н. Чекалин // Сб. тр. Всерос. конф. "Математическое моделирование и проблемы экологической безопасности". – Ростов – на – Дону: Изд–во РГУ, 2000. – С. 127 – 136.
8. Конюхов В.М. Математическое моделирование вытеснения нефти водой при циклическом воздействии на трещиновато–пористый пласт / В.М. Конюхов, А.В. Костерин, А.Н. Чекалин // ИФЖ.–Т.73.–№4.–Июль–Август 2000. – С.695–703.
9. Конюхов В.М. Двухуровневая модель нестационарной фильтрации в трещиновато–пористых средах / В.М. Конюхов, А.Н. Чекалин // ВАНТ. Сер.: Матем. моделирование физич. процессов. Москва. – 2001. – Вып. 3. – С. 37 – 48.
10. Конюхов В.М. Моделирование вытеснения нефти водой при нестационарном воздействии на слоисто – неоднородные пласты / В.М. Конюхов, А.Н. Чекалин, В.Н. Федоров // Изв. РАЕН. Сер. МММИУ. – 2001. – Т.5. – № 3–4, С. 76 – 103.
11. Конюхов В.М. Программный комплекс и тренажер для создания и совершенствования технологий нефтеизвлечения "АРМАРИС" / Ю.А. Волков, В.М. Конюхов, А.Н. Чекалин / Свидетельство № 2002610947 об официальной регистрации программы для ЭВМ. – РОСПАТЕНТ. – Заявка № 2002610690 от 27 апреля 2002г. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14 июня 2002г.
12. Конюхов В.М. Расчет двухфазной многокомпонентной фильтрации в пластах сложного строения / А.Н. Чекалин, В.М. Конюхов, Д.В. Булыгин / Свидетельство № 2002611254 об официальной регистрации программы для ЭВМ. – РОСПАТЕНТ. – Заявка № 2002611340 от 23 июля 2002г. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29 июля 2002г.
13. Конюхов В.М. Моделирование миграции разноплотностных жидкостей в сильно неоднородных пластах / В.М. Конюхов, М.Г. Храмченков, А.Н. Чекалин // Современные проблемы гидрогеологии и гидрогеомеханики. Сб. докл. конф. – СПб.: Изд–во СПб. ун–та, 2002. – С. 405 – 412.
14. Конюхов В.М. Влияние структуры пласта на процесс двухфазной многокомпонентной фильтрации / В.М. Конюхов, А.Н. Чекалин // В кн. "На рубеже веков. НИИ математики и механики Казанского университета. 1998 – 2002гг." – Казань: Изд – во Казан. матем. Общества. – 2003. – С. 266 – 279.
15. Конюхов В.М. Влияние структуры водоносного пласта на процесс миграции тяжелого жидкого загрязнения / В.М. Конюхов, М.Г. Храмченков, А.Н. Чекалин // Там же. – С. 279 – 288.
16. Конюхов В.М. Технологии повышения производительности малодебитных скважин нефтяных месторождений / И.Ф. Садыков, А.Н. Чекалин, В.М. Конюхов, А.А. Марсов, Ю.А. Волков // Повышение нефтеотдачи пластов. Освоение трудноизвлекаемых запасов нефти. Тр. 12–го Европейского симпозиума "Повышение нефтеотдачи пластов" (Казань, 8–10 сентября, 2003). – Казань, 2003. – С. 112 – 118.

17. Конюхов В.М. Фильтрационно-диффузионная модель миграции рассолов в неоднородных водоносных пластах / В.М. Конюхов, М.Г. Храмченков, А.Н. Чекалин // МЖГ. – 2004. – № 2. – С. 140 – 151.
18. Конюхов В.М. Гидродинамические эффекты при фильтрации двухфазных многокомпонентных смесей в нефтяных пластах сложного строения / В.М. Конюхов, А.Н. Чекалин // МЖГ. – 2004. – № 3. – С. 118 – 129.
19. Конюхов В.М. Математическое моделирование имплозионного воздействия на пласт / Ю.А. Волков, В.М. Конюхов, А.В. Костерин, А.Н. Чекалин. – Казань: Изд-во "Плутон", 2004. – 78 с.
20. Konyukhov V.M. Investigation of the process of water–oil displacement in laminated reservoirs taped by horizontal holes / Yu.A. Volkov, V.M. Konyukhov, A.N. Chekalin // Proc. Intern. Symp. On Liquid–Liquid Two–Phase Flow and Transport Phenomena (Antalya, Turkey, November 3 – 7, 1997). – Begel house, inc. New–York, Wallingford (UK). – P. 435 – 445.
21. Konyukhov V.M. Simulation of migration of heavy organic contamination in layered groundwater reservoir / V.M. Konyukhov, A.N. Chekalin // Modern Approaches to Flows in Porous Media. Int. Conf dedicated to P.Ya. Poubarinova – Kochina. Abstracts. (Moscow, September 6 – 8, 1999). – P. 168 – 170.
22. Konyukhov V.M. Migration of heavy liquid contaminations in layered reservoir / V.M. Konyukhov, A.V. Kosterin, A.N. Chekalin // 2nd Symp. "Protection of Groundwater from Pollution and Seawater Intrusion" (Bari, September 27 – October 1, 1999). – 2001. – P. 313 – 325.
23. Konyukhov V.M. Simulation of filtration of heavy liquid contaminant in inhomogeneous aquifer stratum / A.N. Chekalin, M.G., Khranchenkov, V.M. Konyukhov, A.V. Kosterin // Poster Papers. TRAM–2000. Intern. Conf. On Tracers and Modelling in Hydrogeology (Liege, May 23–26, 2000) – Liege, Belgium, 2000. – P. 49 – 54.
24. Konyukhov V.M. Water–oil displacement in fissure–porous reservoir under non–stationary action / A.N. Chekalin, V.M. Konyukhov, A.V. Kosterin, Yu.A. Volkov // Intern. Center For Heat and Mass Transfer. Intern. Symp. on Multiphase Flow and Transport Phenomena (Antalya, Turkey, November 5 – 10, 2000). Begel house, inc. New–York, Wallingford (UK). – P. 96 – 103.
25. Konyukhov V.M. Simulation of two–phase multi–component filtration in layered reservoir/ A.N. Chekalin, V.M. Konyukhov, A.V. Kosterin// Там же. – P.209–216.
26. Konyukhov V.M. Two–phase Model of Filtration of Heavy Liquid Contamination in Layered Aquifer / A.N. Chekalin, M.G. Khranchenkov, V.M. Konyukhov, A.V.Kosterin // Там же. – P. 454 – 461.
27. Konyukhov V.M. Motion of heavy liquid contaminations in layered groundwater reservoir / A.V. Kosterin, A.N. Chekalin // Матем. Моделирование.–2001. – Т. 13, № 3. – С. 41 – 48.
28. Konyukhov V.M. Computational modelling of brine migration in anisotropic inhomogeneous freshwater reservoir / A.N. Chekalin, M.G. Khranchenkov, V.M. Konyukhov, A.V. Kosterin // Proc. 14th. Intern. Conf. on Comput. Methods in Water Resources. – Delft, Netherlands, 2002. – Appendix. – P. 1 – 8.